

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA TEPELNÉ TECHNIKY

Tepelná práce zplyňovacího reaktoru  
The Thermal Work of the Gasification Reactor

Student:	Bc. Lukáš Klus
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Zdeněk Toman, CSc.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra tepelné techniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Klus**  
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství  
Studijní obor: 2109T039 Tepelná technika a keramické materiály  
Téma: Tepelná práce zplyňovacího reaktoru  
The thermal work of the gasification reactor  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše zplyňování biomasy pro kogeneraci
2. Analýza technologie zplyňování
3. Požadavky na vyrobený plyn a možnosti zvýšení účinnosti
4. Vyhodnocení tepelné práce reaktoru a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. KNOEF, H.A.M. *Handbook Biomass Gasification*, Biomass Technology Group, Colosseum 11, Enschede, Nederland, 2012, [www.btg.world.com](http://www.btg.world.com).
2. POHOŘELÝ, Michael a kol. *Zplyňování biomasy*. Chemické listy 106 (4), 2012, ISSN 1213-7103-1803-2309.
3. ŠULC, Jindřich a kol. *Zplyňování biomasy s kogenerací*, [www.biom.cz](http://www.biom.cz), 2011-11-07, ISSN 1801-2655.
4. SLADKÝ, Václav. *Výroba syntetického plynu z pevné biomasy*, [www.biom.cz](http://www.biom.cz), 2010-12-15, ISSN 1801-2655.
5. ŠEJVL, Radovan. *Nové technologie pro využití odpadu pyrolýzou a zplyňováním*, Sborník semináře, Energis 24, Jihlava 5.12.2012, [www.energis24.cz](http://www.energis24.cz).


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Toman, CSc.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Jan Najser, Ph.D.

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018

  
doc. Ing. Jozef Vlček, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# **Zásady pro vypracování diplomové práce**

## **I.**

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).



Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra . . . . .*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

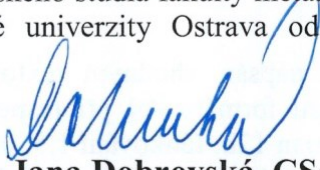
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.**

23.4.2018

*Luděk Klu*

V Ostravě .....

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

Diplomová práce vznikla za podpory grantových projektů SP 2018/94 Tepelné procesy v průmyslu a zvyšování jejich energetické účinnosti a SP 2018/60 Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství.

Rád bych poděkoval všem, kteří přispěli svou pomocí nebo věcnou radou k vytvoření této diplomové práce. Zejména si cením pomoci od doc. Ing. Zdeňka Tomana, CSc. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a ochotu. Dále bych rád jmenovitě poděkoval Ing. Josefu Kohutovi, Ing. Janu Najserovi, Ph.D. a Ing. Peterovi Rákošovi za pomoc při psaní této práce.

Dále děkuji svým rodičům a přítelkyni Monice za podporu během studia.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je přiblížení technologie a její problematiky při zplyňování biomasy pro výrobu syntézního plynu, který je vyráběn za účelem využití v kogenerační jednotce pro výrobu elektrické a tepelné energie.

V práci je vysvětlen pojem biomasa a její optimální vlastnosti pro využití ve formě paliva. Následuje ukázka historických mezníků zplyňování, popis jednotlivých technologií a vyrobeného syntézního plynu. U plynu je popsáno jeho složení, obsažené nečistoty, možné způsoby odstranění těchto nečistot a základní způsoby zužitkovávání plynu.

Práce dále popisuje konkrétní zplyňovací zařízení s kogenerační jednotkou ve Slovenských Mokrancích. Jsou zde uvedeny parametry zařízení a naměřené hodnoty složení syntézního plynu a spalin. Závěrem je provedeno vyhodnocení získaných poznatků ze zařízení v Moldavě.

Klíčová slova: zplyňování, biomasa, kogenerační jednotka, zplyňovací reaktor, syntézní plyn

## **Abstract**

The aim of this dissertation is to introduce the technology and its issues in biomass gasification for the production of synthesis gas (syngas) which is produced for the purpose of utilisation in the cogeneration unit for the production of electric and thermal energy.

The dissertation explains the concept of biomass and its optimal properties for use in the form of fuel. This is followed by a presentation of the historical milestones of gasification, a description of the individual technologies and the produced syngas. The gas is described by its composition, the contained impurities, the possible ways of removing these impurities and the basic methods of gas utilisation.

The dissertation further describes the specific gasification plant with a cogeneration unit in Mokrance in Slovakia. The parameters of the plant and the measured values of syngas and flue gas composition are given here. In conclusion, an evaluation of the acquired knowledge from the plant in Moldova is carried out.

Keywords: gasification, biomass, cogeneration unit, gasification reactor, syngas

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Biomasa.....	11
2.1	Termochemické využití biomasy.....	11
2.1.1	Dokonalé spalování.....	12
2.1.2	Nedokonalé spalování.....	12
2.1.3	Smíšené spalování.....	13
2.2	Biomasa jako palivo pro zplyňování.....	13
2.2.1	Úprava biomasy.....	14
2.2.2	Základní vlastnosti biomasy pro zplyňování.....	14
3	Zplyňování.....	17
3.1	Historie.....	17
3.2	Současnost.....	18
3.3	Proces zplyňování.....	18
3.3.1	Sušicí zóna.....	19
3.3.2	Pyrolýzní zóna.....	19
3.3.3	Redukční zóna.....	19
3.3.4	Oxidační zóna.....	20
3.4	Technologie pro zplyňování.....	21
3.4.1	Autotermní zdroj tepla.....	22
3.4.2	Alotermní zdroj tepla.....	22
3.4.3	Reaktor s pevným ložem.....	22
3.4.4	Reaktor s fluidním ložem.....	25
3.5	Syntézní plyn.....	28
3.6	Nečistoty ve vyrobeném plynu.....	28
3.6.1	Dehet.....	28
3.6.2	Pevné částice.....	29
3.6.3	Sloučeniny dusíku.....	29
3.6.4	Alkalické sloučeniny.....	30
3.6.5	Sloučeniny síry.....	30
3.6.6	Sloučeniny chlóru.....	30
3.7	Způsoby čištění plynu.....	30
3.7.1	Primární čištění.....	31



3.7.2	Sekundární čištění .....	31
3.7.3	Snižování obsahu dehtu .....	32
4	Využití syntézního plynu .....	35
4.1	Plynové hořáky .....	35
4.2	Spalovací motory .....	36
4.3	Spalovací turbína .....	36
4.4	Palivové články .....	37
5	Kogenerace .....	38
6	Experimentální část .....	39
6.1	Zplyňovací zařízení s kogenerační jednotkou .....	39
6.2	Technické parametry zařízení .....	39
6.3	Výpočet množství a výhřevnosti syntézního plynu .....	44
6.4	Měření složení syntézního plynu .....	45
6.5	Porovnání syntézních plynů .....	48
6.6	Měření složení emisí a teploty spalin .....	48
6.7	Měření koncentrace prachu a fyzikálních vlastností spalin .....	49
6.8	Ekonomika zplyňovacích zařízení .....	50
6.9	Shrnutí .....	51
7	Závěr .....	52
	Seznam použité literatury .....	53
	Seznam obrázků .....	55
	Seznam tabulek .....	56
	Seznam vzorců .....	57
	Seznam příloh .....	58

# 1 ÚVOD

Spotřeba energií v dnešní době stále roste, tento trend je způsoben nepřetržitým růstem životní úrovně lidí a s nárůstem počtu obyvatelstva tato potřeba energií opět poroste. Také průmysl má pořád větší spotřebu energií. Z těchto faktů vyplývá otázka, kde bude další energie získávána pro neustále se zvětšující spotřebu. Nyní tuto spotřebu z většiny pokrývají fosilní paliva, jako je ropa, hnědé a černé uhlí, avšak tato paliva zvyšují množství skleníkových plynů v atmosféře, a to hlavně oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$ . Kvůli tomuto znečištění atmosféry dochází ke skleníkovému efektu, což má za příčinu oteplování planety. Fosilní paliva mají také další nevýhodu, a to, že jsou neobnovitelným zdrojem a díky enormní spotřebě se jejich zásoby zmenšují. Z těchto důvodů je potřeba najít nové zdroje energie, které by alespoň částečně a v budoucnu například úplně nahradily fosilní paliva. Už teď se využívají zdroje energií ze slunečního záření, ze síly větru, z vody nebo také z biomasy. Výhodou těchto alternativních zdrojů je jejich obnovitelnost. V současné době je nutné pokračovat ve vývoji zařízení pro získávání energií z obnovitelných zdrojů, a to za účelem zvýšení jejich účinnosti, a také pro snížení pořizovacích nákladů na tato zařízení.

Biomasa má značné přednosti ve své dostupnosti a v malém obsahu popelovin a síry. Ideální je použití odpadní biomasy z dřevozpracujícího nebo ze zemědělského průmyslu. Biomasu lze zplyňovat a získávat z ní energeticky využitelný plyn. Elektrárny na zplyňování je nejefektivnější stavět v blízkosti zdroje paliva z důvodu omezení nutnosti transportu paliva.

Zájem o zplyňování biomasy během staletí kolísal zejména kvůli cenám fosilních paliv. Současný zájem je způsoben především z ekologického hlediska a z politického tlaku na snižování vypouštění emisí  $\text{CO}_2$ .

Značné problémy způsobují nečistoty ve vyrobeném plynu, které se musí obtížně odstraňovat z důvodu možnosti následného využití získaného plynu v energetických zařízeních.

## 2 BIOMASA

Za biomasu považujeme veškeré látky rostlinného a živočišného původu, které jsou biologicky rozložitelné, kromě látek, které jsou uloženy v geologických formacích a byly přeměněny na fosilie [1].

Rostlinná biomasa vzniká díky fotosyntéze neboli biochemickým procesem mezi slunečním zářením, vodou a oxidem uhličitým. Pomocí této reakce dochází k přeměně energie ze slunečního záření na chemickou energii uschovanou v biomase. Do rostlinné biomasy patří zejména dřevní hmota a traviny. Živočišná biomasa je produkována zvířaty a řadí se zde například zvířecí exkrementy. Díky těmto aspektům považujeme biomasu za obnovitelný zdroj energie [2].

Dle některých kritérií se biomasa dá považovat za biopalivo. Skleníkové plyny vzniklé při energetickém využití biomasy jsou pomocí fotosyntézy rostlinami znovu využívány ke svému růstu. Z druhého hlediska je tady fakt, že pěstovanou biomasu musíme hnojit, sklízet, přepravovat, upravovat její vlastnosti atd. K těmto činnostem je zapotřebí značné množství fosilních paliv. Dalším záporným faktorem je i to, že pro získání vhodné půdy na pěstování biomasy se kácí a vypalují lesy, což má veliké ekologické následky [3].

Rostlinná biomasa se z převážné části skládá z celulózy, hemicelulózy a ligninu (tabulka 1).

- **Celulóza** – je polysacharid a vytváří takzvaná celulózová vlákna, která jsou hlavní součástí buněčných stěn stromů a rostlin.
- **Hemicelulóza** – je také polysacharid, ale od celulózy se liší nižší relativní molekulovou hmotností a stavbou chemického řetězce.
- **Lignin** – má funkci pojiva mezi celulózou a hemicelulózou a z větší části je tvořen aromatickými alkoholy [4].

Tabulka 1. Složení rostlinné biomasy [4]

Typ dřeva	Celulóza (%)	Hemicelulóza (%)	Lignin (%)
Měkké	45 - 50	25 - 35	25 – 35
Tvrdé	40 - 55	25 - 40	18 – 25

### 2.1 Termochemické využití biomasy

Základními termochemickými procesy jsou: spalování, zplyňování a pyrolýza.

Spalování je nejstarším termochemickým využitím biomasy. Už na počátku lidské civilizace se využívalo ohně k topení a přípravě pokrmů. Spalování je ve své podstatě rychlou oxidací, která se dělí na dokonalou, nedokonalou a smíšenou [9].

### 2.1.1 Dokonalé spalování

U dokonalého spalování dochází k úplnému spálení všech obsažených hořlavých složek.

Při tomto procesu vzniká oxid uhličitý  $\text{CO}_2$  a součinitel přebytku vzduchu nabývá nadstechiometrických hodnot ( $n > 1$ ) [3].



### 2.1.2 Nedokonalé spalování

U nedokonalého spalování dochází k neúplnému spálení složek paliva a vznikne takzvaný nedopal.

Nedostatkem kyslíku vzniká oxid uhelnatý,  $\text{CO}$  z čeho vyplývá, že součinitel přebytku vzduchu nabývá podstechiometrických hodnot ( $n < 1$ ).



Nedokonalého spalování se také využívá u zplyňování ( $n = 0,2$  až  $0,4$ ) a pyrolýzy ( $n = 0$ ) [3].

#### 2.1.2.1 Zplyňování

Pomocí zplyňování za podstechiometrických podmínek získáváme syntézní plyn (generátorový plyn, dřevoplyn). Vyrobený plyn se následně po upravení energeticky využívá [5]. V průmyslovém měřítku se využívá zplyňování hnědého uhlí kyslíkem a vodní párou v palivovém kombinátu Vřesová, který byl jedním z hlavních zdrojů plynu pro plynárenskou soustavu ČR od šedesátých do devadesátých let. Druhé zplyňování v provozu Úžín, bylo zrušeno v devadesátých letech. Vyrobený plyn ve Vřesové je využíván od roku 1994 v paroplynovém kogeneračním (teplárenském) cyklu s plynovou turbínou ( $2 \times 135 \text{ MW}$ ) a parní turbínou ( $2 \times 65 \text{ MW}$ ). Transformace těžební společnosti Sokolovská uhelna, a.s. je příkladem technologické modernizace energetické společnosti, neboť tržby za elektřinu a teplo převyšují tržby za hnědé uhlí. Atraktivnost paroplynové technologie spočívá v možnosti rychlého startu a náběhu během dvaceti minut na plný výkon. Využit je možné i urychlený náběh plného výkonu za sedm minut, snižuje se tím však životnost turbíny.

#### 2.1.2.2 Pyrolýza

Tato metoda umožňuje získávání plynných, kapalných a tuhých produktů (pyrolýzní plyn, oleje a dehty, dřevěné uhlí). Ve své podstatě znamená tepelný rozklad paliva bez přístupu kyslíku [3]. Uhelným ekvivalentem této technologie je výroba koksu v koksárenské baterii. Technologie pyrolýzy byla průmyslově využívána v městských plynárnách funkčních do šedesátých let, kdy byla nahrazena technologií tlakových kyslíkových generátorů v Úžíně a Vřesové. Vedle hlavního produktu svítiplynu byl dalším produktem polokoks, který byl z dnešního hlediska ekologickým palivem. Popel zůstával v polokoksu a nezatěžoval provoz

plynárén. Kapalné produkty (dehty, aromatické oleje) byly cennou surovinou pro chemický průmysl a průmysl výroby barev (DEZA Valašské meziříčí, Rütgers).

### 2.1.3 Smíšené spalování

V praxi spalování vždy probíhá oběma principy najednou, dokonalým i nedokonalým způsobem neboli smíšeným spalováním [3]. Princip smíšeného spalování je využíván při zplyňování biomasy nebo uhlí v generátorech, kdy energie potřebná pro ohřev biomasy na pyrolyzní teplotu je získávána spalováním části vsazované biomasy. Tuhý zbytek pyrolýzy (dřevěné uhlí) je rovněž zplyňován podstechiometrickým množstvím vzduchu na oxid uhelnatý.

## 2.2 Biomasa jako palivo pro zplyňování

Palivo z biomasy má v energetice nezastupitelné místo a její důležitost nadále poroste se snahami nahradit enormní využívání neobnovitelných fosilních paliv.

Při porovnání fyzikální vlastnosti biomasy jako je například výhřevnost, objemová hmotnost nebo vlhkost v podobě dřevního odpadu nebo slámy s uhlím, lze zjistit fakt, že odpadová, popřípadě účelově vypěstována biomasa musí být energeticky využita v místě jejího vzniku, protože dlouhá přeprava zbytečně zvyšuje ekonomickou náročnost.

Již výběrem vhodného paliva lze výrazně ovlivnit průběh celého zplyňovacího procesu, a hlavně kvalitu vyrobeného syntézního plynu. Žádný reaktor určený ke zplyňování nedokáže efektivně využít jakýkoliv druh biomasy, a proto se musí upravovat vlastnosti paliva podle daného reaktoru. Mezi hlavní faktory, na které se pohlíží, patří vlhkost, granulometrie a celková homogenizace paliva. Nejlépe použitelnou biomasou pro zplyňování je dřevní hmota, popřípadě takzvané energetické plodiny a další podobné suroviny. Mezi energetické plodiny se řadí dřeviny a byliny, které se systematicky pěstují na výrobu energie, mají vysoký výnos suroviny v krátkém čase a jsou nenáročné na růstové podmínky [3].

### Druhy paliva pro zplyňování:

**Dřevní hmota** – mezi dřevní biomasu patří odpad z lesnického a dřevozpracujícího průmyslu nebo rychle rostoucí dřeviny pěstované přímo pro energetické účely, jako jsou například japonské topoly, vrby, paulownie atd.

Ideální je využití tvrdého dřeva, z měkkého dřeva vzniká více dehtu.

**Paliva z nedřevnatých rostlin** – biomasa z nedřevnatých rostlin neboli bylin se získává jako odpad ze zemědělského nebo potravinářského průmyslu, anebo se pěstují záměrně jako energetické plodiny, mezi které patří například šťovík krmný, hořčice sardská, konopí seté, ozdobnice čínská (*miscanthus*), řepková sláma a mnoho dalších [6]. Biomasa pro zplyňování se nejčastěji upravuje do několika forem (tabulka 2).

Využití slámy se zkouší spíše v laboratořích, protože u tohoto paliva dochází ke spékání popela (až 7 %) a může docházet ke struskování a vzniku klenby v reaktoru, v extrémním případě může dojít až k zablokování celého reaktoru.

V praxi se sláma (max. 30 %) přidává k dřevní hmotě a tato směs se využívá v reaktoru.

Tabulka 2. Úprava biomasy na palivo pro zplyňování [19]

<b>Dřevní hmota</b>	polena
	štěpka
	piliny
	pelety
	brikety
<b>Nedřevnaté rostliny</b>	pelety
	brikety
	balíky
	řezanka

### 2.2.1 Úprava biomasy

Převážně u všech druhů biomasy je vyžadována úprava suroviny, neboť její tvarové, fyzikální a chemické vlastnosti se výrazně liší a žádný generátor nemůže efektivně využít všechny druhy paliva [6]. Požadavky na biomasu určenou pro zplyňování jsou závislé na druhu generátoru (tabulka 3).

Tabulka 3. Vlastnosti paliva z biomasy [6]

Vlastnosti paliva	Typ generátoru			
	Protiproud	Souproud	Fluidní	Unášivé lože
<b>Rozměr (mm)</b>	5-100	10-100	0-20	<1
<b>Zrnitost</b>	téměř stejnorodá	stejnorodá	stejnorodá	stejnorodá
<b>Max. vlhkost (hm.%)</b>	50	20	40	15
<b>Min. teplota tavení popelovin (°C)</b>	1000	1250	1000	1250
<b>Max. obsah popelovin (hm.%)</b>	15	5	25	40

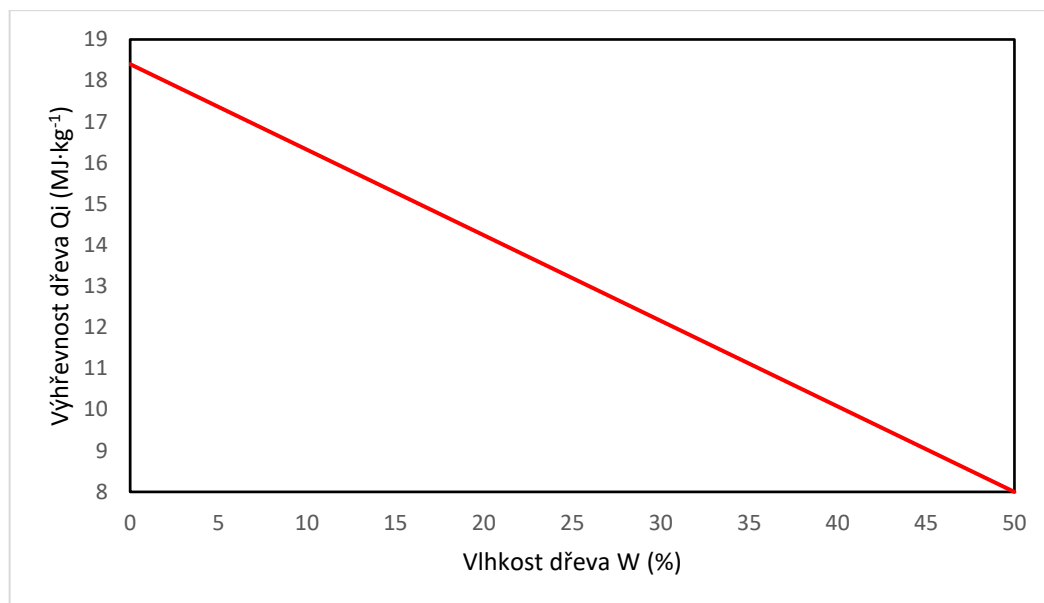
### 2.2.2 Základní vlastnosti biomasy pro zplyňování

Každý typ biomasy má specifické vlastnosti a její kvalitu můžeme ovlivnit již jejím správným výběrem nebo následnými úpravami [7].

#### Vlhkost a výhřevnost

Výhřevnost ( $Q_i$ ) paliva je závislá zejména na vlhkosti  $W$  (obr. 1) a následně i na obsahu popelovin a chemickém složení biomasy. Výhřevnost sušiny většiny druhů používané biomasy se pohybuje okolo hodnot 18-19 MJ·kg<sup>-1</sup>.





Obr. 1 Závislost výhřevnosti dřeva na jeho vlhkosti

Při energetickém využití se vlhkost vyjadřuje jako podíl vody obsažené v palivu k hmotnosti vlhkého paliva. Dalším druhem vlhkosti je vlhkost povrchová. U výroby syntézního plynu zplyňováním se dává přednost relativně suchému palivu z důvodu vyšší kvality produkovaného plynu. Nižší vlhkost způsobuje vyšší výhřevnost, nižší podíl dehtů a vyšší účinnost produkce syntézního plynu. Obsah vlhkosti je také důležitý u paliva s jemnou granulometrií, kde může docházet k tvoření velkých shluků a následnému nerovnoměrnému dávkování paliva do generátoru. V extrémním případě může dojít k zablokování dávkovače paliva. Dřevní biomasa může obsahovat vlhkost ve velkém rozsahu od cca 55 - 60 hm.% v čerstvém stavu až kolem 5 - 10 hm.% po vysušení. Pro většinu zplyňovacích reaktorů je potřeba snížit vlhkost pod 20 hm.% (v praxi běžně kolem 15 %), ideálně se pak dostat na hodnotu kolem 10 hm.%. K sušení je optimální využít odpadní teplo z chlazení spalin nebo z kogenerační jednotky [6].

### Granulometrie

U paliva je podstatné dosáhnout jak rozměrové, tak i fyzikální a chemické homogenizace. Při nedosažení těchto podmínek může docházet k neúplnému zplyňování, ke kolísání kvality syntézního plynu nebo ke vzniku mŕstků a kanálů. Typ použité granulometrie (zrnitosti) biomasy vždy závisí na druhu zplyňovacího reaktoru a podle toho se pak volí způsob zásobování reaktoru palivem. Zrnitost má také vliv na klenbování paliva v zásobníku, a proto se často instalují zařízení na rozrušení klenby. U většiny zplyňovacích zařízení na dřevo se vhodná granulometrie pohybuje okolo 50x10x10 až 80x40x40 mm [8]. Biomasa se nejčastěji upravuje do granulometrie (tabulka 4).

Tabulka 4 Granulometrie biomasy [19]

Granulometrie biomasy					
štěpka (mm)	pelety (mm)	brikety (mm)	palivové dřevo (mm)	hoblíny (mm)	piliny (mm)
5 - 100	Ø < 25	Ø > 25	100 - 1000	1 - 30	1 - 5

### Množství prchavé hořlaviny

Paliva z biomasy obsahují značné množství prchavé hořlaviny (tabulka 5). Prchavá hořlavina se začíná uvolňovat při zahřátí paliva na 150 až 500 °C. Čím více získáme prchavé hořlaviny, tím více je také obsažených dehtových složek, a proto je velmi výhodná oxidační zóna v reaktoru, která umožní z jedné části zplynění a z druhé částečné tepelné rozložení dehtů [9].

Tabulka 5 Obsah prchavé hořlaviny v biomase [6]

Palivo	Obsah prchavé hořlaviny (hm.%)
dřevní hmota	80 - 86
obilná sláma	80 - 88
řepková sláma	80 - 86
rašelina	70

### Obsah popelovin

Popeloviny v biomase jsou tvořeny nespalitelným zbytkem z minerálních a anorganických látek. V praxi může popel obsahovat také část nespáleného paliva, takzvaný nedopal. Biomasa se vyznačuje nízkým množstvím popelovin, ale u různých druhů biomasy může množství výrazně kolísat (tabulka 6). Důležitou vlastností popela je jeho tavitelnost, která závisí na jeho chemickém složení. Díky této vlastnosti může v reaktoru docházet ke struskování a vzniku klenby, v extrémním případě to může mít za následek zastavení celého zplyňovacího zařízení. Pokud palivo obsahuje méně než 5 % popelovin, obecně platí, že ke struskování nedochází [9], [6].

Tabulka 6. Obsah popelovin vztažený na bezvodý stav [6]

Druh biomasy	Obsah popela (hm.%)	Druh biomasy	Obsah popela (hm.%)
dřevní hmota	0,3 - 2	slunečnicová sláma	5 - 20
dřevěné uhlí	2 - 5	sláma z řepky	3 - 10
rašelina	0,5 - 4	sláma z ječmene	10,3
uhlí	5 - 17	sláma z pšenice	7,4
šťovík	2 - 4	vojtěška	6

### 3 ZPLYŇOVÁNÍ

Zplyňováním se biomasa v pevné formě přeměňuje na plyn, který může být po upravení použit v kogeneračním zařízení nebo v plynové turbíně. Tento proces je termochemický a probíhá za vysokých teplot od 700 °C do 1100 °C za pomoci kyslíku, který se do reaktoru přivádí v podobě volného nebo vázaného kyslíku. Volný kyslík se do generátoru přivádí ve formě vzduchu, vzduchu obohaceného kyslíkem nebo jako čistý kyslík. Chemicky vázaný kyslík se přivádí v podobě vodní páry nebo jako oxid uhličitý.

Zplyňování zvyšuje nízkou užitnou hodnotu paliva a probíhá za podstechiometrických podmínek neboli součinitel přebytku vzduchu ( $n$ ) nabývá hodnot od 0,2 do 0,4. U vyrobeného syntézního plynu se dosahuje výhřevnosti ( $Q_i$ ) od 4 až do 7 MJ·m<sup>-3</sup> v případě použití vzduchu jako zplyňovacího média a od 9 do 12 MJ·m<sup>-3</sup> v případě použití kyslíku. Zvýšení výhřevnosti syntézního plynu lze dosáhnout přidavkem zemního plynu, který má výhřevnost cca 36 MJ·m<sup>-3</sup> [10], cenou však zvyšuje náklady a vyžaduje plynovod.

#### 3.1 Historie

K prvnímu opravdovému využití syntézního plynu došlo v Anglii roku 1807, kde se plyn vyrobený z uhlí (svítiplyn) používal k osvětlení Londýna v pouličních plynových lampách. Zplyňování se do roku 1880 poměrně rozvíjelo a vyrobený plyn se zejména uplatňoval ke svícení (až do nástupu Edisonovy žárovky), což umožňovalo pracovat také v noci, nebo ve stále častěji využívaných plynových motorech. K výraznému rozvoji zplyňovacích jednotek došlo za druhé světové války z důvodu nedostatku pohonných hmot. V tomto období bylo využíváno mobilních zplyňovacích zařízení, ve kterých se zužitkovávalo zejména kusové dřevo nebo dřevěné uhlí a vyrobený plyn se používal ke spalování v motorech dopravních prostředků. Tyto mobilní jednotky nebyly moc spolehlivé a bylo nutné je často opravovat, i přesto bylo ve Švédsku v roce 1945 více než 90 % dopravních prostředků poháněno syntézním plynem [7]. Základní historická data jsou uvedeny níže (tabulka 7).

Tabulka 7 Hlavní zlomy ve zplyňování v datech [7]

1699	Děkan Clayton - vyprodukoval plyn z uhlí
1792	W. Murdoch - vyprodukoval plyn z uhlí a použil ho pro svícení
1798	Objev zplyňování uhlí
1806	Staffordské prádelny - instalovaly 900 plynových lamp k osvětlení továrny, domů a cesty
1807	Osvětlení Londýna plynovými lampami
1836	Samuel Brown – navrhl první přenosný generátor plynu
1839	Ve Francii byl postaven Bischofův vertikální generátor
1847	Osvětlení Prahy 150 svítilnami (dosud 2 na Hradčanech)
1861	Bratři Siemensovi – získali patent na svůj zplyňovač v Anglii

1876	Nikolas August Otto – sestrojil první čtyřtákní motor poháněný plynem z uhlí
1879	Dowsonův zplyňovač se systémem čištění chlazení
1887	Byl udělen první patent na zplyňování firmě Lurgi
1922	Winkler začal vyvíjet zplyňovač s fluidním ložem pro uhelný prach
1923	Imbert – získal patent na bezdehtový zplyňovač
1930	Kopper a Todzek – předvedli zplyňovač s unášivým proudem
1936	Lurgi – představil tlakový reaktor s pohyblivým ložem
1980-1990	Ve Vietnamu provozováno více než 40 autobusů na plyn z uhlí
1991	Zkonstruován první IGCC zplyňovač na biomasu ve Värnamo
2000	Výzkum a vývoj technologie zkapalňování biomasy (BTL) pro výrobu pohonných látek
2018	Pokračování ve vývoji a výzkumu nových technologií

### 3.2 Současnost

Zplyňování je v současné době velmi aktuální při hledání zdrojů energie, které by mohly omezit, nebo zcela nahradit využívání fosilních paliv. Při těžení fosilních paliv se mění negativně ráz krajiny a při jejich energetickém využití dochází k znečišťování ovzduší. Patří také mezi neobnovitelné zdroje. Zato biomasa je obnovitelný zdroj a je považována za palivo s nulovou emisní stopou. Zplyňování by v budoucnu mohlo vyřešit problematiku s komunálními a dalšími druhy odpadů.

V dnešní době se nové projekty na zplyňovací elektrárny obtížně uvádějí do praxe. Vývojem zařízení se zabývá málo investorů, což je způsobeno vysokými finančními a technologickými riziky. Zařízení na výrobu syntézního plynu z biomasy nejsou vyráběna v masovém měřítku a zákazníci o ně kvůli jejich vysoké ceně nejeví velký zájem.

Nyní neustále probíhá výzkum za účelem zlepšení spolehlivosti zplyňovacího zařízení a snížení realizačních nákladů [3]. Využívá se především v lokalitách s nedostatečným odběrem elektřiny z rozvodné sítě a využitím jak vyráběné elektřiny, tak tepla, respektive chladu (Mokrance, Kokava nad Rimavicou, trigenerace se zemním plynem Globus Ostrava Poruba).

### 3.3 Proces zplyňování

Podle typu zplyňovacího reaktoru se při zplyňování biomasy uplatňuje více procesů. U využití reaktoru s pevným ložem dochází ke zplyňování ve stabilních zónách, naopak při zplyňování v reaktoru s fluidním ložem se všechny zóny spojí do jedné [11].

### 3.3.1 Sušící zóna

Na odstranění vlhkosti z biomasy je zapotřebí značného množství energie ( $2,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Čím je větší obsah vlhkosti v biomase, tím je zapotřebí více energie. Palivo se při vstupu do reaktoru nejdříve dostává do sušící zóny, kde dochází k jeho ohřívání a při teplotách od 100 do 150 °C také k odpařování vody. Vodní pára znečišťuje získávaný syntézní plyn, a to až v 50 % objemu plynu. Navzdory tomu v redukční zóně reaguje s karbonizátem a vzniká vodík ( $\text{H}_2$ ) a oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ). Z těchto důvodů je optimální vlhkost vstupující biomasy do reaktoru do 15 %. Proto je většinou potřeba biomasu předsušovat, k čemuž se může efektivně využít teplo získávané z kogeneračního zařízení [12].

### 3.3.2 Pyrolýzní zóna

V pyrolýzní zóně dochází k pyrolýze (odplynění) neboli k tepelnému rozkladu biomasy v rozmezí teplot od 150 do 500 °C, a to bez přístupu zplyňovacího média, kterým může být vzduch, kyslík nebo vodní pára. V tento okamžik se z paliva uvolňuje prchavá hořlavina [7]. Pyrolýza umožňuje získávání plynných, tuhých a kapalných produktů.

Prchavá hořlavina (70 až 80 %) v podobě plynu je složena z  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{CH}_4$  a  $\text{H}_2$ . Zbýlý obsah do 100 % je tvořen  $\text{N}_2$ .

Tuhý produkt je z větší části 20 až 25 % tvořen polokoksem neboli tuhým uhlíkem, který v redukční zóně reaguje na  $\text{CO}$ . Obsah popela je závislý na druhu použité biomasy.

Kapalné produkty často obsahují pevné znečišťující látky a vodu. Mají podobu kyselých viskózních olejnatých tekutin hnědé barvy.

Složení a vlastnosti těchto produktů závisí na různých faktorech, a to např. na druhu a vlhkosti použitého paliva, rychlosti ohřevu, teplotě a tlaku, při kterém proces pyrolýzy probíhá atd. [14].

### 3.3.3 Redukční zóna

V redukční zóně vzniká většina žádoucích hořlavých plynů včetně  $\text{CH}_4$ . [7]. Reakce probíhají dle následujících rovnic:

Boudouardova reakce:



Heterogenní reakce vodního plynu:



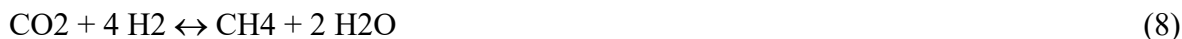
Heterogenní vznik metanu:



Homogenní reakce vodního plynu:



Homogenní vznik metanu:



### 3.3.4 Oxidační zóna

Tato zóna se nachází v oblasti přívodu zplyňovacího média. V tomto prostoru dochází ke spalování (oxidaci) pevného uhlíku a u souprroudých reaktorů k výrazné redukci dehtů obsažených v plynu. Exotermickou reakcí spalování se získává teplo pro endotermický proces zplyňování v redukční zóně, pyrolýzu a vysoušení. Oxidace pevného uhlíku a plynných složek ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) probíhá podle následujících rovnic:

Částečná oxidace pevného uhlíku:



Úplná oxidace pevného uhlíku:



Oxidace  $\text{CO}$ :



Oxidace  $\text{H}_2$ :



Oxidace  $\text{CH}_4$ :

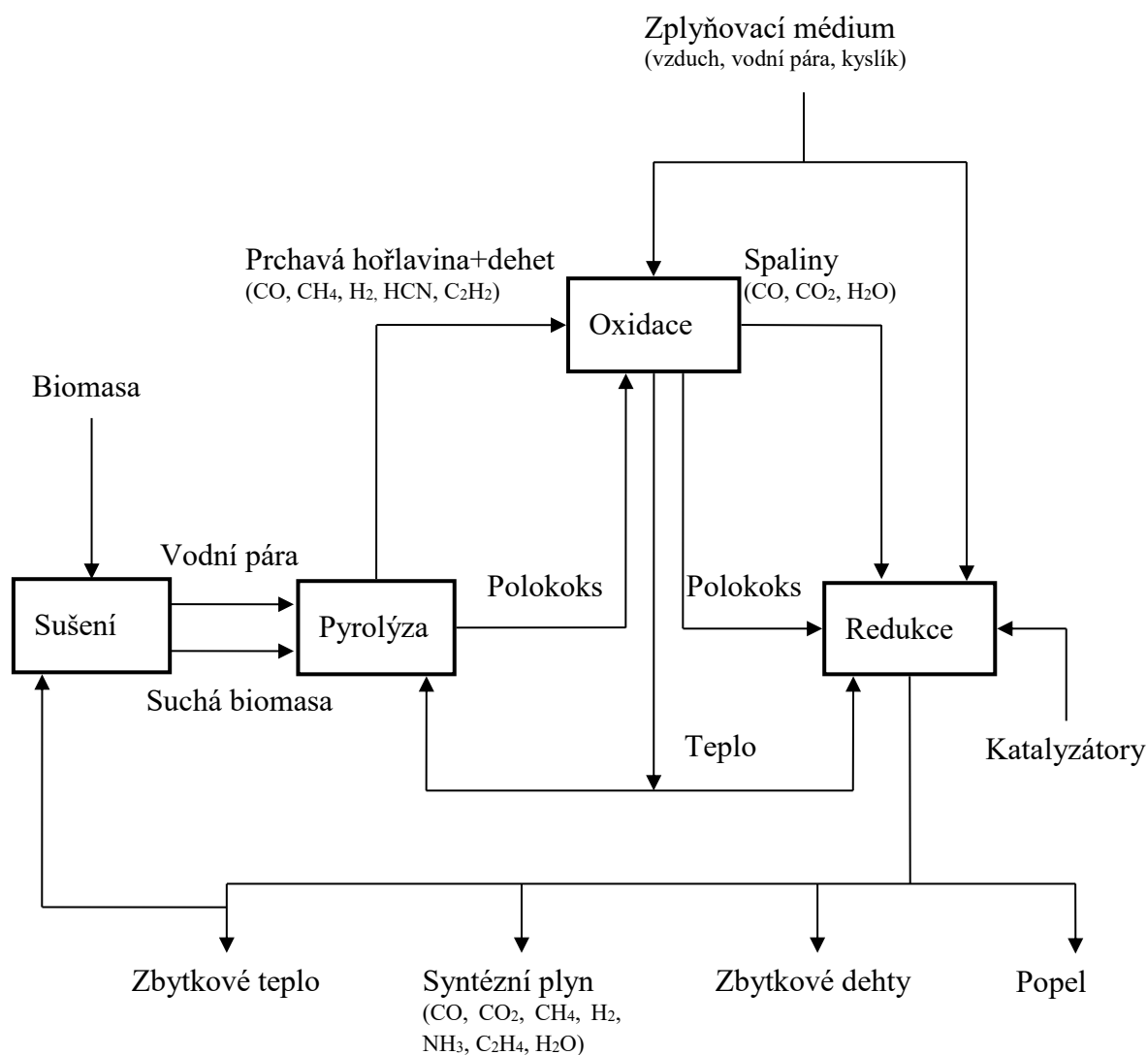


Oxidační zóna nemusí být nutně ve zplyňovacím procesu zařazena. Existují dva způsoby získávání tepla v reaktoru. Prvním způsobem je již popsané částečné spalování přítomných hořlavých médií neboli takzvaný autotermní proces. Druhým způsobem je alotermní proces, při kterém se teplo do reaktoru přivádí z externího zdroje a oxidační zóny není zapotřebí.

V případě použití vzduchu jako zplyňovací médium je do procesu zplyňování přiváděno značné množství dusíku, který se procesu aktivně nezúčastňuje a je zapotřebí dodat hodně tepla na jeho ohřev. Rovněž snižuje výhřevnost produkovaného plynu.

Zóny oxidace a redukce se mohou nacházet i v opačném pořadí, podle druhu zplyňovacího reaktoru [12]. Proces zplyňování je graficky znázorněn na schématu 2.





Obr. 2. Schématické znázornění zplyňovacího procesu [4]

### 3.4 Technologie pro zplyňování

Zplyňování biomasy se provádí ve zplyňovacích generátorech (reaktorech). Konstrukce zplyňovacích zařízení se upravovala už od prvních pokusů se zplyňováním podle druhu paliva a následného využití vyrobeného syntézního plynu. I dnes probíhá vývoj nových zařízení a výzkum hlavně za účelem zvyšování spolehlivosti zařízení.

Zplyňovací reaktory se dají rozdělit podle základních hledisek do několika skupin.

Dělení podle zdroje tepla pro zplyňování:

- autotermní,
- alotermní.

Dělení podle konstrukce reaktoru:

- s pevným ložem → protiproudé, souproudé a s křížovým ložem,

- s fluidním ložem → s bublající vrstvou a s cirkulující vrstvou,
- s unášivým proudem.

Dělení podle zplyňovacího média:

- vzduchové,
- kyslíkové,
- parní.

Dělení podle tlaku v reaktoru:

- atmosférické,
- tlakové [10].

### **3.4.1 Autotermní zdroj tepla**

Teplo potřebné ke zplyňování vzniká přímo v reaktoru pomocí částečné oxidace [7].

### **3.4.2 Alotermní zdroj tepla**

Potřebné teplo se nezískává přímo v reaktoru, ale přivádí se přes výměník z externího zdroje, popřípadě lze použít i oddělenou zplyňovací a oxidační zónu [7].

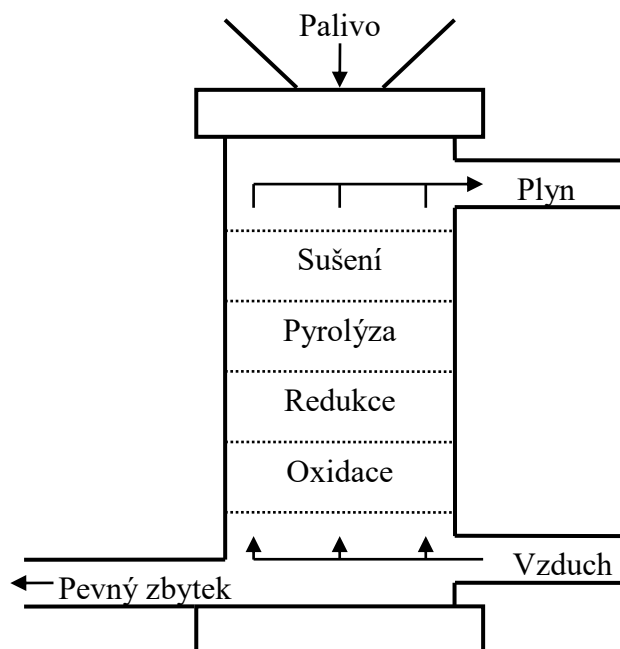
### **3.4.3 Reaktor s pevným ložem**

Jako synonymum pro reaktor s pevným ložem se používá sesuvný generátor. Potřebné teplo v reaktoru se získává autotermním, nebo alotermním způsobem a paliva se zplyňovacím médiem mohou vůči sobě proudit třemi způsoby. Souběžně jedním směrem u souproudu (downdraft), proti sobě u protiproudu (updraft) a výjimečně i s křížovým prouděním (cross-current). Reaktor s pevným ložem má výhody v jednoduché konstrukci a v jednoduché obsluze zařízení, kvůli čemuž je také často uplatňován v provozu [9].

### 3.4.3.1 Protiproudý reaktor

U protiproudého reaktoru se palivo dává do horní části zařízení a vlastní hmotností se sesouvá směrem dolů. Naproti tomu se zplyňovací médium přivádí spodem a proudí přes všechny zóny až nahoru. Vzniklý syntézní plyn může mít výhřevnost až  $7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$  a je odváděn horní částí reaktoru (obr. 3).

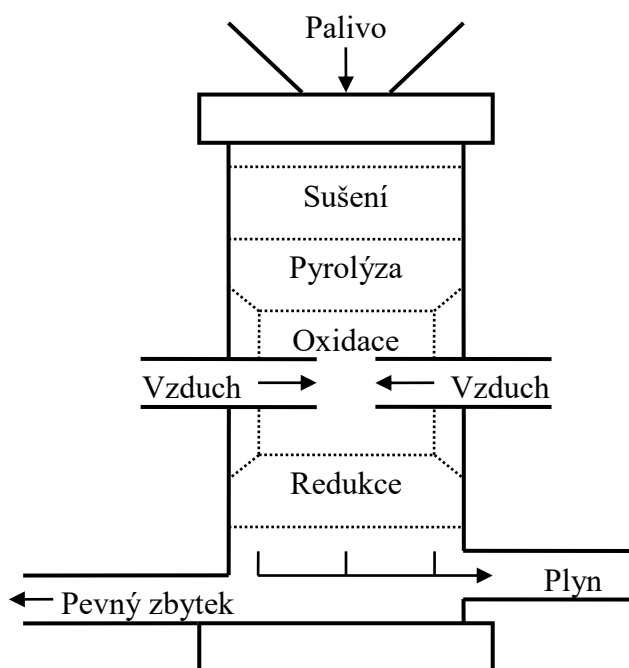
Protiproudý reaktor má značné výhody v jednoduché konstrukci a nízké náročnosti na energii pro zplyňovací proces. Použité palivo může obsahovat relativně velký podíl vlhkosti, a to až 30 % s vysokým obsahem popelovin. Získaný syntézní plyn obsahuje malé množství prachových částic, ale oproti tomu obsahuje značné množství dehtů. Pokud chceme plyn využít v kogenerační jednotce, je zapotřebí jej od dehtů vyčistit. Tento způsob zplyňování může dosáhnout až 80 % účinnosti a dosahovat výkonu od několika  $\text{kW}_t$  až  $10 \text{ MW}_t$  [2].



Obr. 3. Schéma protiproudého reaktoru [2]

### 3.4.3.2 Souproudý reaktor

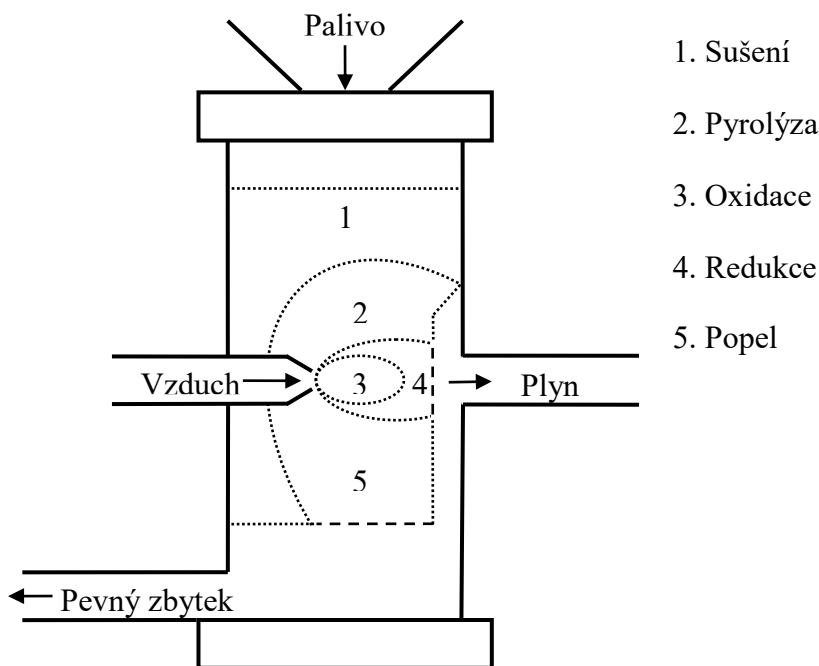
Konstrukčně se souproudý reaktor výrazně podobá protiproudému zařízení (obr. 4). Palivo se nejčastěji přivádí horní částí a v ojedinělých případech spodem. U souproudu i protiproudu se využívá podobné granulometrie paliva, a to v rozmezí od 20 do 200 mm. Palivo v tomto případě musí obsahovat maximálně 20 % vlhkosti. Získávaný syntézní plyn obsahuje značné množství prachových částic a jeho maximální výhřevnost dosahuje  $5,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ . Předností tohoto plynu je nízký obsah dehtů, a to až o 15 x menší než u protiproudu. Účinnost těchto zařízení se přibližuje až k 70 % a jejich výkon se pohybuje od  $100 \text{ kW}_t$  až do  $1 \text{ MW}_t$  [4].



Obr. 4. Schéma souproudého reaktoru [2]

### 3.4.3.3 Reaktor s křížovým tokem

Reaktor s křížovým tokem byl původně určen na výrobu syntézního plynu z dřevěného uhlí. Tato zařízení našla uplatnění v rozvojových zemích, kde se využívají ve spolupráci s plynovými motory, pro které se syntézní plyn nemusí složitě čistit, stačí pouze cyklon a filtr. Tyto zplynovače mají malý rozsah výkonu [7]. Schéma reaktoru s křížovým tokem níže (obr. 5).



Obr. 5. Schéma reaktoru s křížovým tokem [2]

### 3.4.4 Reaktor s fluidním ložem

Malé pevné částice paliva jsou působením proudícího plynu ve vznosu a chovají se jako kapaliny. Dno reaktoru je porézní a je naplněné pískem, dolomitem nebo vysokopecní struskou.

Reaktory s fluidní vrstvou lze dělit podle stavu lože a intenzity sdílení hmoty a to na:

- reaktory se stacionárním (bublajícím) ložem,
- reaktory s cirkulujícím ložem.

Reaktory s cirkulujícím ložem jsou schopny pracovat jak za běžných podmínek, tak i za zvýšeného tlaku a rychlost plynu se pohybuje okolo 5 až 15  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . U stacionárních loží se tato rychlost plynu pohybuje okolo 2 až 6  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Instalací horkého cyklónu za reaktor se umožní zachycené pevné částice paliva vracet zpět do reaktoru. Tento typ generátorů se většinou provozuje za vyšších teplot, a to nad 800°C. Vyrobený syntézní plyn má pak vysokou teplotu.

Hlavními přednostmi reaktoru s fluidním ložem jsou:

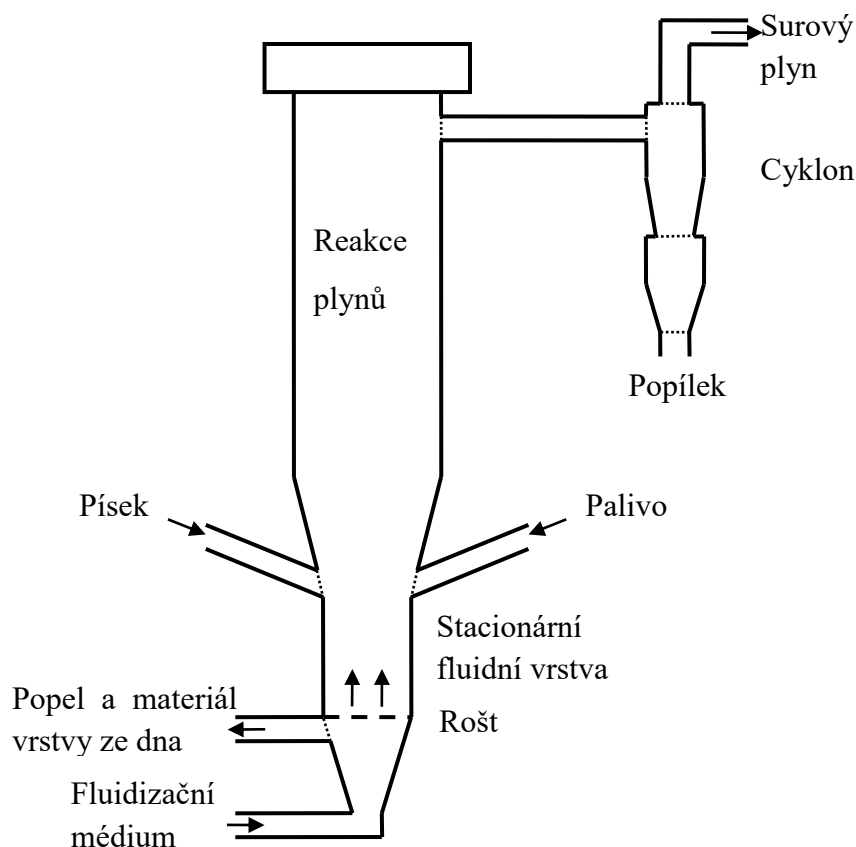
- kompaktní konstrukce, díky velkým přestupům tepla,
- možnost použití různých paliv bez zásahu do konstrukce zařízení,
- použití paliva s nízkou teplotou tavení popela.

Nevýhody reaktoru s fluidním ložem:

- vysoký obsah dehtu a pevných unášených částic ve vyrobeném plynu,
- neúplné vyhořívání paliva,
- obsah par alkalických kovů ve vyrobeném plynu,
- nutnost dmýchadla [9].

#### 3.4.4.1 Reaktor se stacionární fluidní vrstvou

U tohoto typu reaktoru je důležitá úprava granulometrie za účelem dosažení homogenního rychlostního profilu. Jako zplyňovací médium se nejčastěji používá vzduch, popřípadě vodní pára nebo směs kyslíku a páry. Tyto reaktory se staví o výkonech od 500 kW až po 50 MW [1]. Schéma reaktoru se stacionární fluidní vrstvou je uvedeno níže (obrázek 6).

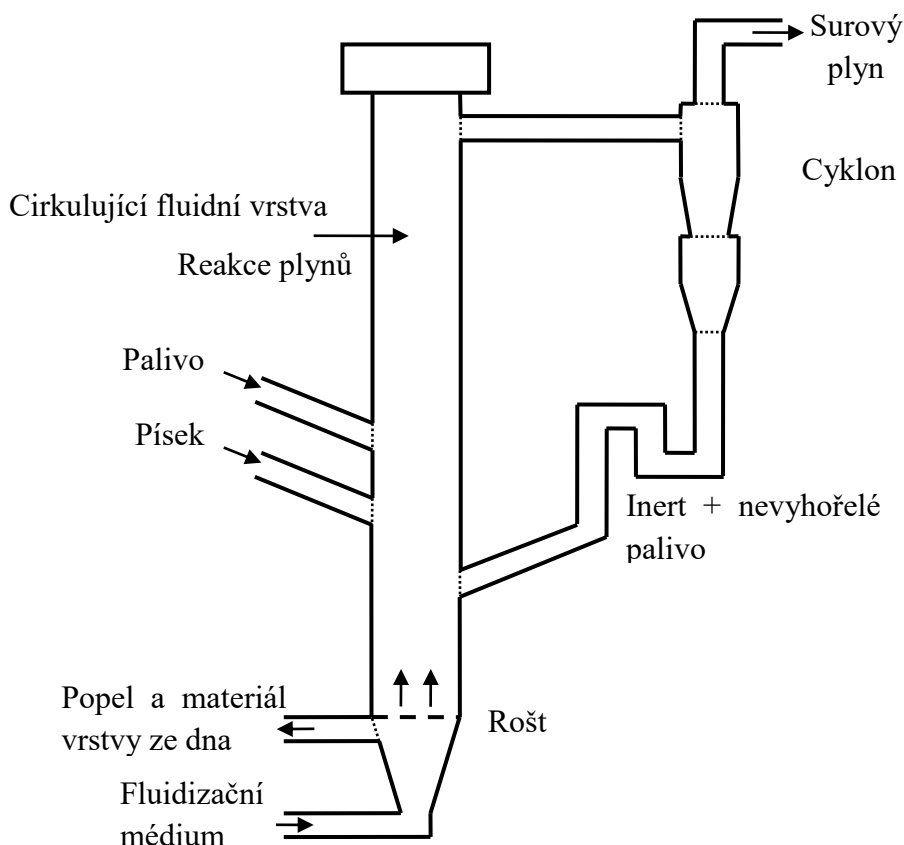


Obr. 6. Schéma reaktoru se stacionární fluidní vrstvou [15]



### 3.4.4.2 Reaktor s cirkulující fluidní vrstvou

Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou dosahují vysokých výkonů, často až několika stovek MW, a proto musí být zajištěna dodávka dostatečného množství paliva. Ke konstrukci zplynovače se instaluje cyklónový odlučovač, který umožňuje vrácení unášivých zbytků paliva a inertního materiálu. Zdroj tepla může být u atotermního i alotermního druhu, kde u alotermního způsobu se dosahuje dvakrát větší výhřevnosti vyrobeného syntézního plynu [15]. Schéma reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou níže (obr. 7).



Obr. 7. Schéma reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou [15]

### 3.4.4.3 Reaktor s unášivým proudem

Těmto zařízením se také říká cyklónové reaktory a dosahují vysokých výkonů nad 100 MW až do 1000 MW. U těchto zařízení je nutné upravit granulometrii paliva pod 1 mm, a proto se biomasa v tomto případě moc nevyužívá. Místo biomasy se používá ke zplyňování prachové uhlí nebo kapičky oleje, které se dávkuje společně se zplyňovacím médiem horní částí reaktoru. Palivo v reaktoru se většinou nezdrží ani jednu sekundu a díky vysokým teplotám 1300 °C až 1600 °C je zajištěna vysoká čistota vyrobeného syntézního plynu kvůli rozkladu dehtu. Vysoké teploty umožňují odvádění popela z reaktoru v tekuté podobě. Při zplyňování v reaktoru s unášivým proudem se využívá zvýšených tlaků, nejčastěji kolem 2 až 6 MPa [17].

### 3.5 Syntézní plyn

Syntézní plyn vyrobený zplyňováním biomasy je tvořen hořlavými a nehořlavými složkami. Nehořlavé složky  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  snižují výhřevnost plynu, a proto by jejich obsah měl být co nejmenší. Na chemické složení syntézního plynu má zásadní vliv výběr druhu biomasy využitě jako palivo v reaktoru [14]. Obvyklé složení syntézního plynu je uvedeno následovně (tabulka 8).

Tabulka 8. Složení syntézního plynu při použití vzduchu jako zplyňovacího média [10]

Složení	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
%	10 - 18	8 - 16	2 - 6	45 - 60	12 - 16

### 3.6 Nečistoty ve vyrobeném plynu

Složení a čistota syntézního plynu je ovlivnitelná několika faktory, a to druhem paliva, zplyňovacím médiem, typem zplyňovacího reaktoru a samotným průběhem zplyňování [4]. Způsob využití vyrobeného syntézního plynu je ovlivněn jeho čistotou. Obsažené nečistoty mohou zanášet jednotlivé části energetických zařízení, což vede k následným poruchám a nutným opravám. Způsob čištění plynu se volí podle typu znečištění a podle zařízení, ve kterém bude energeticky zužitkován [11]. Vlhkost obsažená v syntézním plynu se odstraňuje ochlazením plynu na cca 3 °C (dojde ke zkondenzování vody) a před použitím se ohřeje na 15 °C. Při této zvýšené teplotě by už nemělo docházet k žádné kondenzaci vody v energetickém zařízení. Mezi nejzásadnější znečišťující látky patří:

- dehet,
- pevné částice,
- sloučeniny dusíku,
- alkalické sloučeniny,
- sloučeniny síry,
- sloučeniny chlóru [10].

#### 3.6.1 Dehet

Složení, vlastnosti a množství dehtů závisí na celkových podmínkách průběhu zplyňování, jako jsou např. rychlost ohřátí paliva, teplota v reaktoru, doba pobytu paliva v reaktoru, na jeho složení atd. V případě využití vyrobeného syntézního plynu v kogenerační jednotce je potřeba množství dehtů snížit na co nejmenší hodnotu. Zatím se nepodařilo zkonstruovat takový reaktor, který by umožnil zplynění biomasy bez vzniku dehtu, a proto tato technologie zatím nedosáhla většího uplatnění v praxi. Jestliže se dehet v plynu vyskytuje ve formě par, lze ho efektivně využít v plynových turbínách. Obsah dehtu se dá ve vyrobeném plynu omezit zvýšenou teplotou, ale jeho termická stabilita prudce roste, a proto je složité dehty úplně odstranit.

Dehty je složité jednoznačně definovat, protože se skládají z velkého množství chemických sloučenin. Obvykle se uvádí, že dehty jsou složeny z organických látek s bodem

varu vyšším, než má benzen 80,1 °C. Pro ulehčení charakteristiky vlastnosti dehtu se užívá rozdělení podle stupně jeho transformace na:

- primární dehet,
- sekundární dehet,
- terciální dehet.

Primární dehet se vyskytuje hlavně v plynu z protiproudého reaktoru a terciální dehet zase v plynu ze souprroudých a fluidních generátorů. Pochopením tvorby a transformace dehtu v reaktoru umožňuje objevení problémů spojených s optimálním nastavením reaktoru a následného napravení problémů.

Měření obsahu dehtu v plynu se provádí zejména off-line metodami, a to zachytáváním dehtu v roztoku organického rozpouštědla a následně analytickým vyhodnocením vzorků. On-line metody se zatím spíše používají pro výzkum v laboratořích [2], [10].

Získané dehty jsou vhodnou surovinou například pro chemický průmysl.

### 3.6.2 Pevné částice

Pevné částice obsažené v odvádějícím syntézním plynu jsou tvořeny anorganickými látkami neboli popelovinami, nezreagovanými částmi paliva (polokoksem) a mohou zde patřit také částice unášené z fluidního lože. Z těchto látek syntézní plyn nejvíce znečišťují popeloviny. Větší část popelovin je odváděna mimo reaktor přes rošt v podobě popela a zbylá část je unášena syntézním plynem. Obsah pevných částic v plynu lze ovlivnit výběrem druhu biomasy a typem zplyňovacího reaktoru. Nejvíce unášených částic vzniká u reaktoru s fluidním ložem z důvodu turbulentního proudění v reaktoru.

Na odlučování pevných částic z plynu se používá instalovaných cyklónů, kde u reaktorů s fluidním ložem se tyto odloučené částice mohou vrátit zpět do reaktoru a zvýšit tak účinnost výroby. Cyklónový odlučovač není schopen odstranit všechny frakce pevných částic, a ty nejjemnější zůstávají v syntézním plynu, což může mít za následek spojování těchto částic s dehty a usazování na chladných částech zařízení [10].

### 3.6.3 Sloučeniny dusíku

Množství obsaženého dusíku v plynu je ovlivnitelné zejména druhem použitého zplyňovacího média. Hlavní formou dusíku v syntézním plynu je N<sub>2</sub>. Tento plynný dusík se zplyňování neúčastní a je potřeba mu dodat značnou energii na jeho ohřátí. Dusík může také snížit výhřevnost syntézního plynu až na hodnotu kolem 3,5 MJ·m<sup>-3</sup>, což je limitní hodnota pro stabilní provoz kogeneračních zařízení.

Dusík se v syntézním plynu objevuje také v podobě sloučenin, a to zejména jako čpavek (NH<sub>3</sub>), kyanid (HCN), oxid dusnatý (NO) a oxid dusný (N<sub>2</sub>O). Tyto sloučeniny jsou taktéž nežádoucí, neboť způsobují korozi potrubí a armatur zařízení. Při použití mokrého čištění se tyto sloučeniny dostávají do vody a následkem toho může koroze poškodit přečerpávací zařízení [4].

### 3.6.4 Alkalické sloučeniny

U syntézního plynu je důležité množství a složení alkalických sloučenin, protože ovlivňují bod měknutí, tání a vypařování popelovin. Biomasa obsahuje alkalické sloučeniny solí, a to zejména draslík K. Draslík se používá v hnojivech na podporu růstu energetické biomasy a odtud se pak dostává přes reaktor až do syntézního plynu.

Vysoký obsah alkalických sloučenin komplikuje čištění syntézního plynu. Některé alkálie se vypařují již při cca 700 °C a už v reaktoru vytvářejí různé sloučeniny, a to např. hydroxid draselný (KOH) nebo chlorid draselný (KCL). Běžné druhy filtrace nejsou schopny tyto páry zachytit.

Jaké bude mít energetické využití vyrobený plyn je ovlivněno obsahem alkalických sloučenin. Při využití plynu ve spalovacích kotlích je přítomnost alkalických sloučenin možná. Naopak u spalovacích motorů a plynových turbín je zapotřebí důkladného odstranění alkalických sloučenin, jinak by docházelo k zanášení a poruchám těchto zařízení. Běžně se provádí chlazení syntézního plynu, čímž se dosáhne kondenzování alkalických sloučenin na malých pevných částech, které se následně odstraňují. V tomto případě je nutné počítat s možností koroze, způsobenou alkalickými solemi na stěnách kovových a keramických bariérových filtrů a s vysokými ztrátami tepla při použití elektrostatických, rukávových filtrů nebo mokrých praček [2].

### 3.6.5 Sloučeniny síry

Biomasa může obsahovat různé množství síry od stopových množství u dřeva, přes 0,4 % u travin a stébelnin až do hodnoty přesahující 1 % u znečištěné biomasy například barvami. Podle podmínek v reaktoru síra reaguje a vzniká sirovodík ( $H_2S$ ) nebo oxidy síry ( $SO_x$ ). Na využití syntézního plynu v kogenerační jednotce nemá vysoký obsah síry žádný vliv.

Při odstraňování dehtů pomocí kovových katalyzátorů je potřeba dávat pozor, neboť už malé koncentrace síry tyto katalyzátory dokážou zničit.

Síru lze ze syntézního plynu odstranit účinnými mokřými vypírkami nebo pomocí reakce s vhodným sorbentem [2].

### 3.6.6 Sloučeniny chlóru

Chlór se v syntézním plynu vyskytuje hlavně ve formě kyseliny chlorovodíkové ( $HCl$ ) a v biomase se většinou vyskytuje v nízkých koncentracích do 0,01 %, kde se dá odstranit mokrou vypírkou. I přes tyto nízké koncentrace může tvořit perzistentní chlór obsahující organické látky korozi kovových částí zařízení a omezení reaktivity některých katalyzátorů [2].

## 3.7 Způsoby čištění plynu

Nejllepší je korigovat vznik nečistot výběrem biomasy a správného typu zplyňovacího reaktoru. Největší snahy se dávají do odstraňování dehtů a pevných prachových částic. Tyto nečistoty mohou zkomplikovat proces zplyňování, a hlavně využití vyrobeného

syntézního plynu v kogeneračních jednotkách. Hlavní nebezpečí je v kondenzaci a usazování těchto nečistot v zařízeních. V extrémních případech může docházet až k ucpávání armatur.

Podle nejzákladnějšího hlediska lze čištění rozdělit na dva druhy:

- primární,
- sekundární [9].

### **3.7.1 Primární čištění**

Tyto metody se zabývají předcházením vzniku nečistot a omezením jejich množství. Množství nečistot lze ovlivnit správným výběrem zplyňovacího zařízení pro daný typ biomasy. Velmi důležitá je také odborná obsluha zaopatřující správný chod zplyňovacího pochodu dosažením optimálních fyzikálních podmínek (teplota  $T$ , tlak  $p$ , koncentrace) a chemických reakcí uvnitř zplyňovacího reaktoru [16].

### **3.7.2 Sekundární čištění**

Vyrobít syntézní plyn takové čistoty, aby jej šlo přímo energeticky využít je velmi náročné, a proto je zapotřebí za zplyňovací reaktor instalovat čistící zařízení pro odstranění nežádoucích látek. Tomuto dodatečnému čištění se říká sekundární čištění a dá se díky němu zlepšit kvalitu plynu pro následující použití [10].

#### **3.7.2.1 Cyklony**

Pomocí cyklonů se odstraňují ze syntézního plynu pevné částice, kde tyto částice nesené plynem dopadají na stěnu cyklonu a díky odstředivé a gravitační síle se odlučují od plynu a spadají do spodní části zařízení. Syntézní plyn je naopak odváděn horní částí.

Při odstraňování větších částic (nad 70 – 100  $\mu\text{m}$ ) cyklony pracují poměrně s vysokou účinností. Se zmenšováním (kolem 10  $\mu\text{m}$  a menší) těchto částic klesá i účinnost, která se poté pohybuje okolo 50 – 80 %. Samotný cyklonový odlučovač nedokáže dostatečně vyčistit syntézní plyn pro kogenerační zařízení. A u plynových turbín je zapotřebí snížit velikost částic pod  $d < 5 \mu\text{m}$ . Abychom syntézní plyn mohli použít v plynové turbíně je zapotřebí před ní instalovat virový cyklon malého rozměru, ve kterém je možné dosáhnout vysokých rychlostí. U velkých zařízení se využívá tzv. multicyklonu. Multicyklon je zkonstruován spojením více malých odlučovačů dohromady.

Cyklony pracují za vysokých teplot, a to okolo 600 °C a při použití keramického vstupu mohou tyto teploty stoupnout až na 1000 °C.

V praxi se tyto zařízení často používají, neboť jsou relativně levné a hlavně spolehlivé [10].

### 3.7.2.2 Filtry

U filtrů se využívá profukování syntézního plynu přes filtrační médium a na něm zachytávání nečistot. Filtrace umožňuje odstraňování zejména prachových částic. Některé druhy zařízení umožňují i odstraňování dehtů a jiných nečistot.

Filtrací existuje mnoho druhů a mezi ně patří i textilní filtry. Tento typ pracuje s vysokou účinností při zbavování plynu prachových částic, ale je zapotřebí ho provozovat při vyšších teplotách z důvodu zabránění zanášení filtru dehty. Dosažení teplot až 850 °C umožňují skelná a keramická vlákna. Čištění filtru se provádí zpětným profouknutím vyčištěným syntézním plynem nebo inertním plynem (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>).

Dalším využívaným typem je membránový filtr. Tento druh se vyrábí z keramických materiálů, syntetických polymerů nebo z modifikované přírodní celulózy. Membránový filtr umožňuje odstranění nečistot o velikosti 0,005 až 10 μm, tudíž lze ze syntézního plynu filtrovat i dehet a další nečistoty [9], [18].

### 3.7.3 Snižování obsahu dehtu

U primárních technik odstraňování dehtu se jedná o procesy uplatňované uvnitř reaktoru a umožňují omezení potřeby odstraňovat dehet sekundárním způsobem, díky čemuž dochází k poklesu investičních i provozních nákladů.

Povolené množství dehtu se odvíjí od typu zařízení, ve kterém bude syntézní plyn zužitkovan. Nejvíce choulostivé zařízení na obsah dehtů je spalovací motor v kogenerační jednotce. Ke snižování obsahu dehtu se dá využít několika způsobů, viz následující text [10].

#### 3.7.3.1 Termický rozklad

Výzkumy ohledně zplyňování daly za vznik novým způsobům tepelného čištění plynů. Při zplyňování biomasy vzniká dehet, který je tepelně stálý, a proto je zapotřebí dosáhnout vysokých teplot pro jeho krakování. Pokud není použit katalyzátor, je potřebné dosáhnout teplot okolo 1000 °C, optimálně přes 1200 °C, aby docházelo ke štěpení dehtů. Při těchto teplotách je nutností použít materiály, které tyto podmínky vydrží. Za účelem dosažení vysokých teplot se většinou musí spálit část vyrobeného syntézního plynu za stálého přivádění sekundárního vzduchu. Tento vzduch do reaktoru a následně do vyrobeného plynu přivádí další dusík. Společně se spálením části výhřevných složek plynu klesá výhřevnost syntézního plynu až o 25 - 30 %.

Obvyklé využití termických metod v praxi je způsobeno relativně malou investiční náročností a jednoduchostí procesu, i přesto, že snižují účinnost a zároveň i ekonomickou stránku kogenerační jednotky [2].

#### 3.7.3.2 Katalyzátory

Katalyzátory jsou složky, které slouží k urychlení nebo přímo umožňují průběh samotné chemické reakce. Katalyzátory se dávkuje jako pevné látky přímo do lože nebo v podobě mokrého nanášení na používané palivo. Některé katalyzátory, jako jsou např. dolomit, olivín,



křemenný písek a jiné minerály či kovové látky, lze efektivně přidávat přímo do fluidního lože. Tento způsob má výhodu ve své jednoduchosti.

Účinnější, než primární přidávání katalyzátorů je využití externího reaktoru umístěného za zplyňovacím generátorem. Při této metodě není potřeba dosahovat vysokých teplot a syntézní plyn si tak ponechává svoji výhřevnost [10].

Druhy katalyzátorů:

**přírodní:**

- vápenato-hořečnaté horniny (vápenec, dolomit, magnezit),
- olivín,
- jílovité materiály,
- oxidy železa,

**syntetické:**

- koks,
- krakovací katalyzátory,
- uhličitany a oxidy alkalických kovů,
- aktivované alumina,
- katalyzátory s přechodovými kovy [15].

Výzkumem byly vyvinuty syntetické akumulátory, které umožňují nižší spotřebu energie a levnější výrobu syntézního plynu, z čehož vyplývá také vyšší účinnost celkového procesu. K nejčastěji využívaným patří niklový syntetický katalyzátor, který má vysokou účinnost při odstraňování dehtu z plynu. Ale je potřeba dávat pozor na jeho náchylnost k deaktivaci neboli na ztrátu jeho aktivity v důsledku otravy sloučeninami síry ( $\text{H}_2\text{S}$ ) zauhlíkováním nebo poškozením alkalickými kovy [12].

### **3.7.3.3 Čištění pomocí vody**

U tohoto způsobu čištění se syntézní plyn vypírá pomocí vody ve vodních pračkách. V této vodě se zachytávají kondenzující složky dehtu a další nečistoty, např. čpavek a chlorovodík. Nevýhodou vodních praček je, že nečistoty se pouze převedou do vody, která se pak musí náročně čistit a je zde značná ztráta tepla syntézního plynu [2].

### **3.7.3.4 Absorpce**

Absorpce znamená pohltivost a jako čistící médium se nejčastěji používá bionafta nebo organická rozpouštědla a oleje. Účinnost absorpce postupně klesá se zvyšujícím se obsahem dehtu v médiu, a proto se musí médium pravidelně obměňovat. Jednou z vlastností média by měla být snadná regenerovatelnost nebo možnost spálení. Výhodou absorpce je účinnost i za vyšších teplot a snížení rosného bodu dehtu [2].

### **3.7.3.5 Adsorpce**

Adsorpce je hromadění částic (nečistot) na povrchu pevné látky. Jako adsorpční médium se používají pevná uhlíkatá média s velkým aktivním povrchem. Tuto podmínku nejlépe

splňuje aktivní uhlí ( $400\text{--}1500\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ). Dalším použitelným médiem je například dřevěné uhlí nebo nezreagovaný zbytek ze zplyňování. Při použití aktivního uhlí může docházet k zanášení jeho pórů nečistotami z plynu ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), tímto zanášením se snižuje adsorpční schopnost média a je zapotřebí jej vyměnit za nové [2].

## 4 VYUŽITÍ SYNTÉZNÍHO PLYNU

Technologie použita na čištění syntézního plynu se odvíjí od vlastností plynu, druhu nečistot v něm obsažených, a hlavně na způsobu následného využití plynu.

Syntézní plyn vyrobený zplyňováním biomasy se dá po vyčištění energeticky zužitkovat vícero technologiemi:

- výroba tepla v plynových hořácích a kotlích,
- spalování v plynových motorech,
- spalování v plynových turbínách,
- výroba energie v palivových článcích.

Probíhá také výzkum v přípravě kapalných biopaliv II. generace. Biopaliva druhé generace představují paliva vyrobená z obnovitelných zdrojů, a na rozdíl od paliv první generace nevyužívají suroviny, které by se daly potravinářsky zužitkovat a mají až 90 % potenciál snížení emisí CO<sub>2</sub> oproti fosilním palivům [3], [5], [9].

### 4.1 Plynové hořáky

Nízko výhřevný syntézní plyn se přímo spaluje za účelem získávání tepelné energie, která se využívá na provoz vápenek, sušení a na mnoho dalších technologických účelů. V tomto případě se na čistotu plynu nekladou obzvlášť velké nároky. Musí se pouze hlídat, aby emise vzniklých spalin nepřesáhly povolené limity a je potřeba zamezit nánosům prachu a dehtu vlivem jeho kondenzace, a proto teplota na povrchu potrubí nesmí klesnout pod 300-350 °C. Na přívodní potrubí je dobré využít materiály odolné proti korozivním kyselým složkám obsažených v plynu [9]. Hořák je zobrazen níže (obr 8).



Obr. 8. Použití plynového hořáku při výpalu keramiky

## 4.2 Spalovací motory

Motory jsou nejpoužívanějším způsobem využití syntézního plynu pro produkci mechanické energie. Výhodou spalovacích motorů je jejich jednoduchost a možnost po úpravě využití běžně vyráběných motorů jak zážehových, tak i vznětových. Většímu uplatnění brání dehty a pevné částice obsažené v plynu. Prachové částice opotřebovávají pohyblivé části motoru a dehty se usazují na chladných částech a ve studeném plynu tvoří stabilní aerosoly. Na uhlíkatých nánosech v motoru dochází k jeho adsorpci i za vyšších teplot. Po delší době, a hlavně při cyklickém kolísání teplot, tvoří zachycený dehet pevné nánosy. Největší nebezpečí tvoří kombinace dehtu a prachu, kdy je tento proces urychlován uhlíkatými částicemi. Vzniklé nánosy způsobují provozní problémy. S vývojem nových typů motorů se stále zvyšují nároky na čistotu plynu.

Důležité je také sledování čistoty oleje v motoru. Čím je syntézní plyn znečištěnější, tím je potřeba častější výměny oleje. Četnost výměny se dá prodloužit větším zásobníkem oleje.

Optimální použití spalovacích motorů je v kogenerační jednotce umožněno kombinovanou výrobou elektrické a tepelné energie. Pro konstantní výkon je nutné zamezit kolísání výhřevnosti plynu a jeho přiváděného množství [9]. Motor zobrazen níže (obr. 9).



Obr. 9. Spalovací motor značky Tedom určený do kogenerační jednotky [21]

## 4.3 Spalovací turbína

Plynové turbíny jsou choulostivé na čistotu syntézního plynu a daly by se popsat jako rotující spalovací motory. Hlavními problematickými nečistotami jsou pevné částice, které narážejí do lopatek turbíny a způsobují jejich erozi. Další problémy skýtají nánosy a vysokoteplotní koroze alkalickými kovy. I dehty mohou tvořit značné problémy. U dehtů se předpokládá jejich shoření ve spalovací komoře, ale v důsledku odlišných spalovacích vlastností nemusí shořet všechny, a pak vznikají saze, které zvyšují opotřebení lopatek. Také uvolněná část nánosu dehtu a pevných částic z přívodního potrubí ve spalovací komoře zcela neshoří a následně dochází k závažnému poškození lopatek [9]. Plynová turbína je uvedena následně (obr. 10).



Obr. 10. Plynová turbína [22]

#### 4.4 Palivové články

Při použití palivového článku nedochází ke spalování paliva, ale jedná se o elektrochemické zařízení převádějící chemickou energii využitého paliva na energii elektrickou, a proto účinnost palivového článku není omezoována Carnotovým a Braytonovým cyklem, díky čemuž je umožňováno dosahování vyšších účinností [10], [9].

Palivové články jsou velice citlivé na čistotu plynu, a proto je zatím tato technologie spíše otázkou výzkumu. Největší problém skýtá síra v palivu, která prodražuje celou technologii [2].

V praxi se jako palivo do palivových článků využívá velmi čistého vodíku a ojediněle se používá na pohon například dopravních prostředků, ale tyto případy slouží spíše na propagaci této technologie. Palivový článek níže (obr. 11).

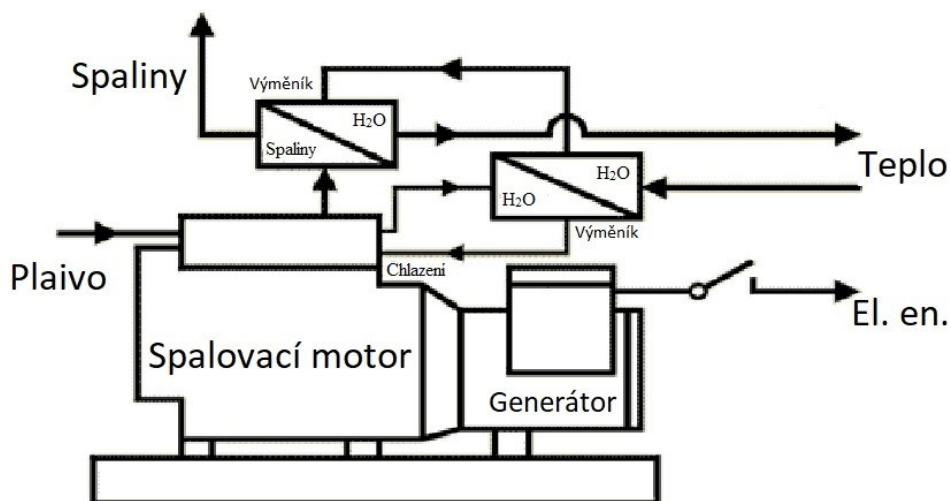


Obr. 11. Palivový článek využit na pohon autobusu [23]

## 5 KOGENERACE

Kogenerační jednotka umožňuje získávat ze syntézního plynu kombinovanou výrobou elektrickou a zároveň i tepelnou energii. V kondenzačních elektrárnách se snížené kondenzační teplo na úrovni 50 až 60 °C za parním kondenzátorem nevyužívá a je vypouštěno do okolního prostředí. Kogenerace (teplárenství) dává parní odběrovou turbínou možnost toto „odpadní“ teplo využít např. na ohřev vody nebo na vytápění 130 °C, díky čemuž stoupá účinnost a zároveň i návratnost celé zplyňovací elektrárny, a zároveň je také šetrnější k přírodě. Kogenerace se využívá v objektech, kde je zaručen odběr elektrické, a hlavně tepelné energie, jako jsou například průmyslové závody, zdravotnická centra, zemědělské a dřevozpracující provozy a mnoho dalších. Využít se dá také mikrokogeneračních zařízení, která slouží pro menší objekty. Základní schéma uvedeno na obr. 12.

Elektřina vyrobená kogenerací se většinou zužitkovává přímo na místě výroby a případné přebytky se odvádějí (prodávají) do rozvodné sítě a získaná tepelná energie se nejčastěji využije na ohřev vody [9].



Obr. 12. Schéma kogenerace [24]

Výstavba nového zplyňovacího zařízení s kogenerační jednotkou je ekonomicky velmi nákladná investice. Vyrábění pouze elektrické energie z biomasy je z pohledu využití energie tohoto paliva neefektivní. Mnohem výhodnější je pomocí kogenerace vyrábět a využívat jak elektrickou, tak i tepelnou energii. Tato technologie výrazně eliminuje ztráty a dochází k nárůstu celkové účinnosti výroby energií až na úroveň přes 90 %. Zvyšováním efektivnosti získávání energií z biomasy klesá i doba návratnosti celého zařízení.



## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část práce se týká problematiky konkrétního zplyňovacího zařízení s instalovanou kogenerační jednotkou ve slovenské obci Mokrance v blízkosti Moldavy nad Bodvou v Košickém kraji. Bylo provedeno měření, kdy během dvou dnů byly měřeny hodnoty složení syntézního plynu a spalín.

### 6.1 Zplyňovací zařízení s kogenerační jednotkou

Výstavba zplyňovací elektrárny v obci Mokrance byla zahájena v roce 2014. V roce 2017 získalo zařízení TÜV (Technischer Überwachungs Verein) certifikát. V češtině tato zkratka znamená technické kontrolní sdružení. TÜV je německé sdružení organizací, zabývající se testováním výrobků všeho druhu za účelem ochrany lidí a životního prostředí proti různým nebezpečím. V dnešní době elektrárnu majitel provozuje pouze ojediněle na propagační ukázky technologie a předpokládá se, že v blízké budoucnosti bude v nepřetržitém provozu. Technické výkresy celého zařízení jsou součástí příloh 1, 2, 3.

### 6.2 Technické parametry zařízení

Elektrárna slouží k získávání syntézního plynu s následným využitím v kogenerační jednotce pro výrobu elektrické a tepelné energie.

Zařízení se skládá z jednoho souproudého reaktoru typu CPW 600 TR s pevným roštem. Syntézní plyn se zužitkovává ve dvou plynových spalovacích motorech Schmitt Enertec. Každý z motorů pracuje o elektrickém výkonu 250 kW. Vyrobená elektrická energie se částečně zužitkovává v areálu a částečně prodává do rozvodné sítě a získané teplo slouží k sušení paliva ve formě biomasy. Předpokládaná spotřeba paliva se pohybuje okolo 4400 tun·rok<sup>-1</sup> o průměrné výhřevnosti 14,5 MJ·kg<sup>-1</sup> a o vlhkosti 15 %. Plánuje se nepřetržitý provoz na 3 pracovní směny.

Palivo se do reaktoru dopravuje pomocí korečkového dopravníku přímo do násypky reaktoru. Chemické reakce vznikající v reaktoru jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9. Přehled chemických reakcí uvnitř reaktoru [25].

Rovnice chemické reakce	Reakční teplo (kJ·mol <sup>-1</sup> )
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	+123
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	+283
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	+394
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	+242
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	+41
$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	+206
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	-118
$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	-173
$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	+75
$2CO + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	+248
$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	+163

Průběh zplyňování je však mnohem složitější, než jak naznačují rovnice z tabulky 9. Uvedené rovnice jsou pouze stechiometrickým výrazem výchozích a konečných stavů při průběhu zplyňování. Během zplyňování vznikají i mezistádia, v nichž se tvoří i jiné reakce, které ovlivňují konečné složení plynu.

Reakce probíhají při teplotách  $<1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vyrobený syntézní plyn má na výstupu z reaktoru teplotu cca  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  a musí se před použitím v kogenerační jednotce několikastupňovým způsobem vyčistit. Plyn je veden pomocí dmýchadla přes cyklón do Venturiho pračky (mokrý prání), následně pak do zařízení Tarbox, které slouží k hrubému odstraňování dehtů, poté se plyn čistí pomocí elektrostatického odlučovače. Dalším zařízením je zásobník plynu, ze kterého plyn dále postupuje do dvou jemných filtrů a poté do vyrovnávacího zásobníku o objemu  $7,5\text{ m}^3$ , následují dva tkaninové filtry. Následně dochází ke kondenzaci vlhkosti pod rosný bod, díky čemuž dochází ke snížení absolutní vlhkosti a poté se plyn pomocí tepelného výměníku ohřeje na  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , čímž se zabrání kondenzaci vody v motoru kogenerační jednotky. Z výměníku tepla je plyn přímo vedený do spalovacích motorů. Předpokládané parametry a naměřené hodnoty vyrobeného plynu jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10. Parametry syntézního plynu

Složení plynu	Parametry udávané výrobce	Naměřené hodnoty (US Steel Košice – Labortest, s.r.o)
$\text{H}_2$ (%)	16 - 19	18,10
$\text{CO}_2$ (%)	8 - 14	10,60
$\text{O}_2$ (%)	1	0,28
$\text{CO}$ (%)	$\geq 16$	17,90
$\text{CH}_4$ (%)	0,1 - 3	2,70
$\text{N}_2$ (%)	50 - 52	48,92
Výhřevnost ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ )	5,5 - 7	5,18
Průtok plynu ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	0,417	0,417
Výstupní teplota plynu z reaktoru ( $^{\circ}\text{C}$ )	600	600

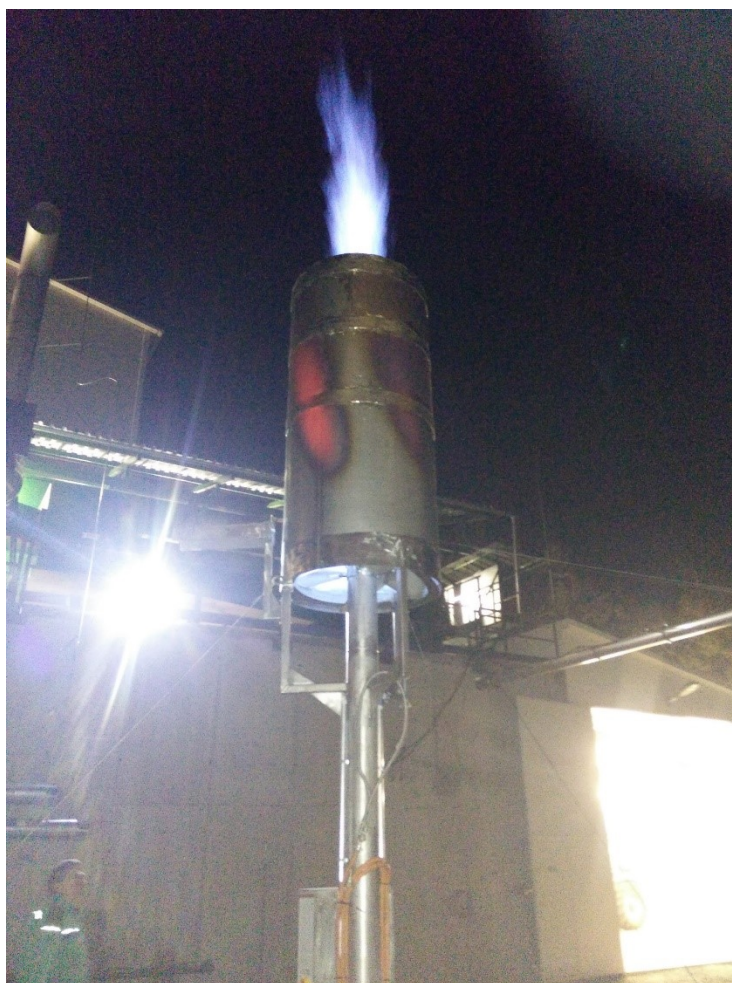
Dehet získaný z čištění plynu je skladován v izolovaných nepropustných sedimentačních nádržích. Z těchto nádrží je v pravidelných intervalech vybírán do k tomuto určených nádob pro skladování nebezpečného odpadu a následně je odprodáván firmám s oprávněním k jeho dalšímu využití. V areálu elektrárny se získaný dehet nijak nezpracovává ani nezneškodňuje. Odhadované množství dehtu ve vyrobeném plynu je  $150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  plynu, po filtraci by se měl obsah snížit pod  $20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Počítá se s  $7,78\cdot 10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1} \rightarrow 2,2\text{ t}\cdot\text{rok}^{-1}$  vyseparovaného dehtu ze syntézního plynu.

Voda pro čištění a chlazení plynu ve vodní pračce koluje v uzavřeném cyklu. Technologie využívá sedimentační nádrž a samostatnou nádrž pro zásobování vodní pračky.



System mokrého praní, který kromě čištění plynu zabezpečuje i jeho chlazení, je ještě jištěný atmosférickým chladičem.

Vyrovňovací zásobník plynu je vybavený bezpečnostním příslušenstvím, včetně přetlakového ventilu a protiexplozivních membrán. Technologie je doplněna také o fléru. Fléra je typ atmosférického hořáku, který spaluje syntézní plyn v době náběhu technologie – zplyňovacího reaktoru, kdy produkovaný syntézní plyn ještě nedosahuje potřebných parametrů pro použití v motorech kogenerační jednotky za účelem výroby elektrické a tepelné energie. K spuštění bezpečnostní fléry bude také docházet při odstavení zplyňovacího reaktoru a v případě výpadku, poruchy anebo při servisních pracích na kogenerační jednotce. Fléra je uvedena na obrázku 13. Modrý plamen ukazuje na vysoký obsah vodíku v plynu.

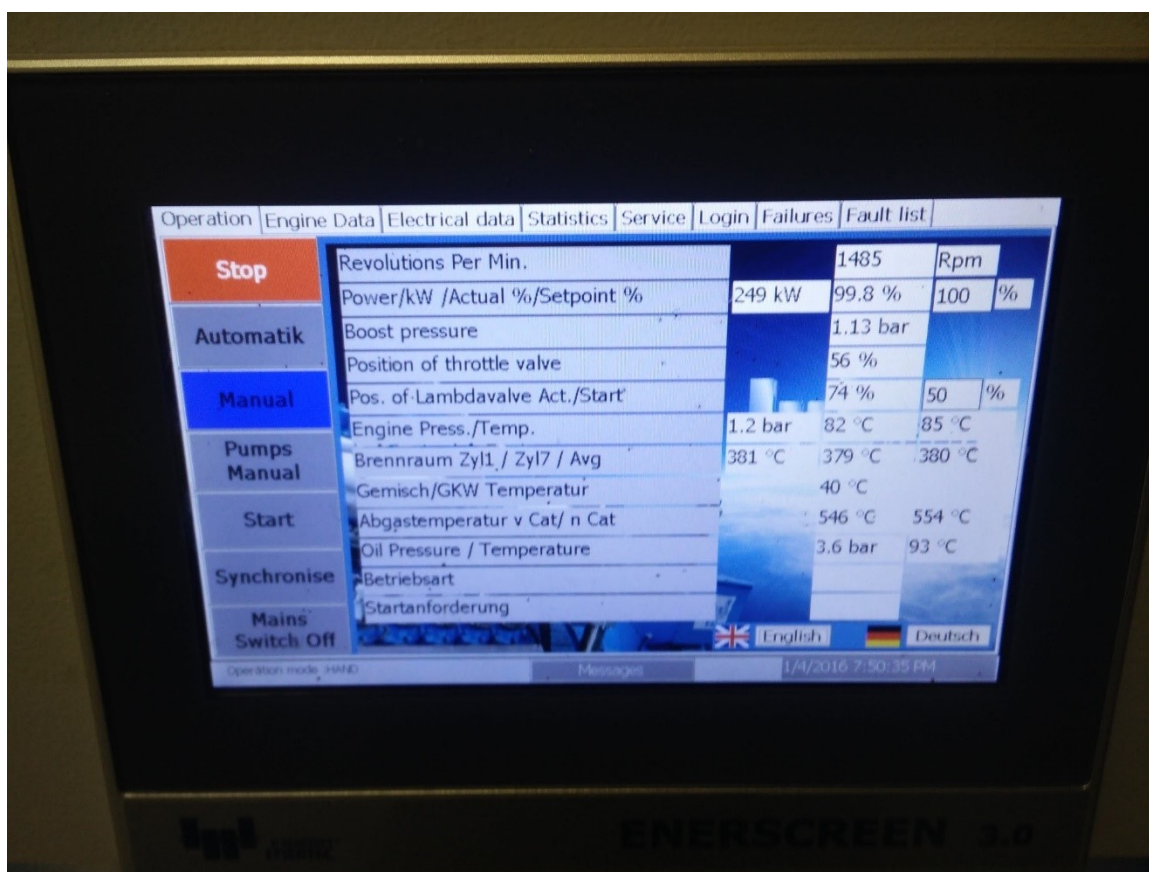


Obr. 13. Zařízení fléra při spalování syntézního plynu

Potrubním rozvodem je plyn přiváděn do strojovny se 2 ks kogeneračních jednotek Schmitt Enertec FMB-318-HSMK od firmy Schmitt Enertec Německo o maximálním výkonu 2x250 kW. Technické parametry této jednotky jsou uvedeny v tabulce 11 a ukázka řízení pomocí počítačového software na obrázku 14. Teplo z chladicí soustavy motorů je využíváno na sušení biomasy určené ke zplyňování.

Tabulka 11. Parametry kogenerační jednotky Schmitt Enertec FMB-318-HSMK

Elektrický výkon (kW <sub>e</sub> )	Elektrická účinnost (%)	Příkon v plynu (kW <sub>t</sub> )	Tepelná účinnost (%)	Celková účinnost (%)	Teplota spalin (°C)	Průtok spalin (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
250	33,4	748	50,1	83,6	480	0,3



Obr. 14. Řízení pomocí počítačového software

#### Technologická zařízení použitá v elektrárně:

- Korečkový dopravník 1 ks
- Reaktor 600TR 1 ks
- Cyklón 1 ks
- Venturiho pračka 1 ks
- Dmýchadlo 1 ks
- Sběrný zachytávač dehtu 1 ks
- Elektrostatický filtr 1 ks
- Přívod plynu k bezpečnostní fléře 1 ks
- Hrubý filtr 2 ks
- Jemný filtr 4 ks
- Vyrovnávací plynová nádrž 1 ks
- Textilní filtr 2 ks



- Tepelný výměník na chlazení plynu před vstupem do KGJ 1 ks
- Kalové čerpadlo 3 ks
- Čerpadlo 2 ks
- KGJ Schmitt Enertec 250 kw 2 ks

Hlavním druhem paliva je biomasa ve formě štěpky (obrázek 15) o vlhkosti 15 – 20 %. Palivo je dováženo z externího zdroje a před použitím je skladováno ve venkovním meziskladu a následně ve vnitřním skladovacím prostoru paliva. Uvažuje se také o částečném nahrazení biomasy složkou TAP. Zkratka TAP znamená tuhé alternativní palivo, v angličtině je tento materiál nazýván jako SRF – Soil Recovered Fuel. Tuhá alternativní paliva mají nesmírnou výhodu, že umožňují spalitelný a jinak už nerecyklovatelný odpad energeticky využít. TAP tvoří vyseparované odpady jako jsou např. plasty, pryže, textil, papír, dřevo, kůže, kompozitní materiály atd. Je plánováno, že se k biomase bude přidávat 20 – 80 % TAP. Palivo TAP je zobrazeno na obrázku 16.



Obr. 15. Dřevní štěpka



Obr. 16. Ukázka tuhého alternativního paliva

Předpokládá se, že kogenerační jednotka bude v provozu cca 8000 hodin ročně v období přibližně 334 dní. K provozu bude zapotřebí 7 zaměstnanců na směnu, z toho jeden na administrativní práci a šest osob na obsluhu celé elektrárny v třísměnném provozu.

Maximální výrobní kapacity navrhovaného technologického provozu:

- instalovaný elektrický výkon → 0,5 MW,
- instalovaný tepelný příkon → 0,748 MW.

Emisní hodnoty spalin naměřené 5. 12. 2014 Národní energetickou společností, a. s. nepřekračují emisní limity dané zákonem. Naměřené hodnoty a emisní limity jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12. Emise spalin naměřené Národní energetickou společností, a. s. + emisní limity

Měřená složka	Průměrná hodnota	Max. hodnota	Emisní limity
	(mg·m <sup>-3</sup> )		
<b>TZL</b>	2,4	2,6	10
<b>CO</b>	92	94	250
<b>NO<sub>x</sub></b>	150	151	190
<b>SO<sub>2</sub></b>	< 5,4		-
<b>TOC</b>	120		-

### 6.3 Výpočet množství a výhřevnosti syntézního plynu

Jak již bylo řečeno, vlastnosti a složení syntézního plynu vzniklého při zplyňování závisí hlavně na druhu paliva, druhu zplyňovacího média a na teplotě.

Hlavními zplyňovacími reakcemi jsou rovnice (14) a (15), které představují ideální stav (bez tepelných ztrát) pro přeměnu uhlíku na energetický plyn.



Kdyby při zplyňování nedocházelo ke ztrátám, bylo by možné zcela využít teplo získané exotermní reakce (14) pro průběh endotermní reakce (15).

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ kmol } C + 11,2 \text{ m}^3 O_2 + 11,2 \cdot \frac{79}{21} \text{ m}^3 N_2 = \\
 &= 22,4 \text{ m}^3 CO + 11,2 \cdot \frac{79}{21} \text{ m}^3 N_2 + 123,1 \text{ MJ} \cdot \text{kmol}^{-1}
 \end{aligned}$$

Z čehož vyplývá:

$$12 \text{ kg } C + 11,2 \text{ m}^3 O_2 + 42,11 \text{ m}^3 N_2 = 22,4 \text{ m}^3 CO + 42,11 \text{ m}^3 N_2 + 123,1 \text{ MJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

Bez tepelných ztrát by tyto rovnice probíhaly v poměru svých tepelných efektů.

$$\begin{aligned} \frac{123,1}{118,5} \cdot 12 \text{ kg } C + \frac{123,1}{118,5} \cdot 18 \text{ kg } H_2O = \\ = \frac{123,1}{118,5} \cdot 22,4 \text{ m}^3 CO + \frac{123,1}{118,5} \cdot 22,4 \text{ m}^3 H_2 - \frac{118,5}{118,5} \cdot 123,1 \text{ MJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \end{aligned}$$

Z obou uvedených rovnic získáme:

$$CO: 22,4 + \frac{123,1}{118,5} \cdot 22,4 = 45,6 \text{ m}^3 \cdot 24,41 \text{ kg}^{-1} C \quad (41,1 \%)$$

$$H_2: \frac{123,1}{118,5} \cdot 22,4 = 23,3 \text{ m}^3 \cdot 24,41 \text{ kg}^{-1} C \quad (21,0 \%)$$

$$N_2: 11,2 \cdot \frac{79}{21} = 42,1 \text{ m}^3 \cdot 24,41 \text{ kg}^{-1} C \quad (37,9 \%)$$

$$\text{Vzniklý plyn: } = 111,0 \text{ m}^3 \cdot 24,41 \text{ kg}^{-1} C \quad (100 \%)$$

Výhřevnost plyných paliv lze stanovit jako součet uvolněných tepel při spalování hořlavých složek plyného paliva za odpovídajících podmínek. Obecně lze vztah pro určení výhřevnosti ( $Q_i$ ) zapsat rovnicí (16):

$$Q_i = \sum_{i=1}^n r_i \cdot Q_{i,i} \text{ (J} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (16)$$

kde  $n$  je počet hořlavých složek v plyném palivu (1),

$r_i$  - objemové zastoupení dané složky v 1 m<sup>3</sup> plynu (m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>),

$Q_{i,i}$  - výhřevnost dané složky (J·m<sup>-3</sup>).

$$Q_i = 0,411 \cdot 12,640 + 0,21 \cdot 10,760 = 7,454 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

při zplyňování 1 kg C vzduchem a 0,76 kg H<sub>2</sub>O vznikne 4,55 m<sup>3</sup> plynu o výhřevnosti 7,454 MJ·m<sup>-3</sup>.

## 6.4 Měření složení syntézního plynu

Měření koncentrací jednotlivých látek v syntézním plynu získaného ze zplyňování dřevní štěpky se vždy provádělo na k tomu určeném odběrném místě on-line metodou pomocí analyzátoru GAS 3100 SYNGAS (obr. 17). Než je syntézní plyn zaveden do analyzátoru, je zapotřebí jej zbavit prachových částic a ochladit, aby došlo k vyseparování látek (dehtu), které by v analyzátoru mohly kondenzovat a zanášet ho. Analyzátor pracuje na principu infračervené spektrometrie, kdy paprsek laseru prochází plynem a pomocí zrcadel dopadá na detektor, který vyhodnotí množství paprsku o určité vlnové délce, který prošel vzorkem. Naměřené hodnoty se zobrazí na displeji analyzátoru a dále se dají vyhodnocovat v připojeném počítači. Analýza probíhala během dvou dnů, ve dvou samostatných měřeních.



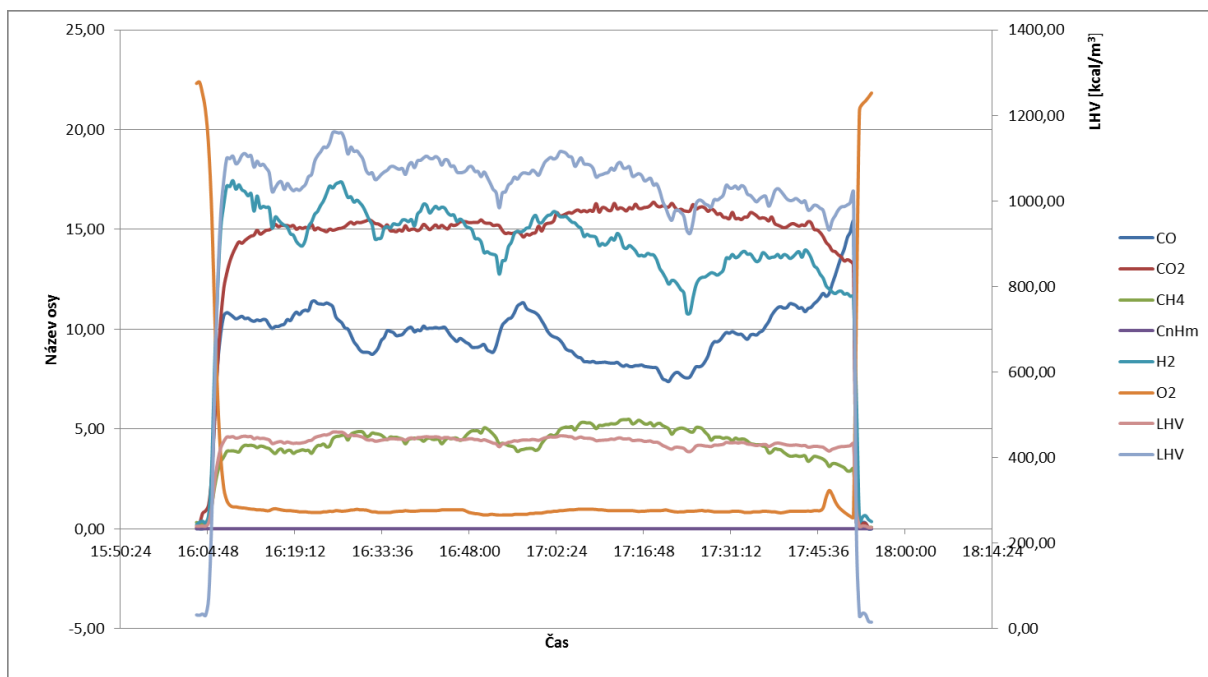
Obr. 17. Odběr plynu

Po dobu měření se teplota okolního vzduchu pohybovala okolo 17,5 °C, tlak 980 kPa a relativní vlhkost 79 %. Získané průměrné a maximální hodnoty z jednotlivých měření jsou uvedeny v následující tabulce 13 a trendy měření z jednotlivých dnů na obr. 18 a 19.

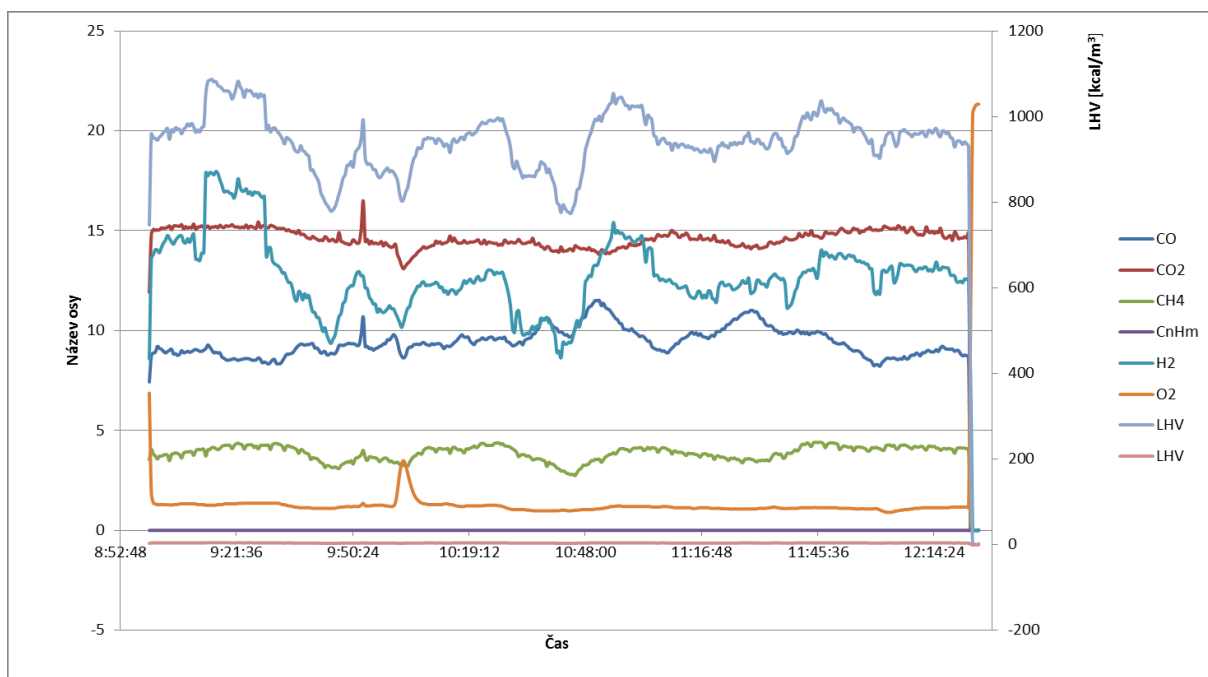
Tab. 13. Průměrné a maximální složení syntézního plynu

Složka	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
<b>Maximální hodnota první den (%)</b>	9,34	14,39	4,19	0,00	13,81	2,01
<b>Maximální hodnota druhý den (%)</b>	11,51	16,50	4,39	0,00	17,97	6,87
<b>Průměrná hodnota za oba dva dny (%)</b>	9,33	14,49	3,99	0,00	13,21	1,66





Obr. 18 Trendy měřených veličin plynu z prvního dne



Obr. 19 Trendy měřených veličin plynu z druhého dne

Výhřevnosti analyzovaného plynu v jednotlivých dnech byly:

První den: maximální  $Q_i = 4,17 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

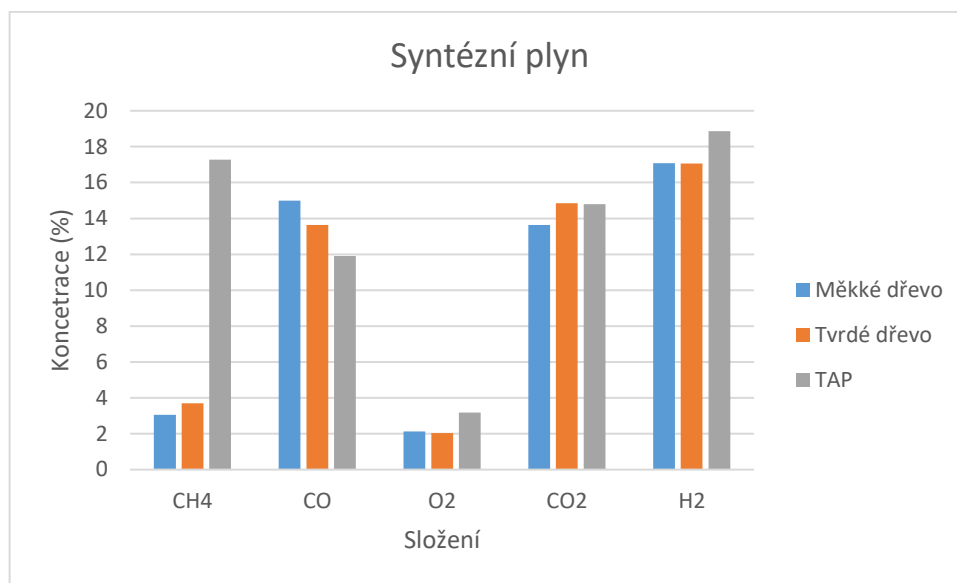
Druhý den: maximální  $Q_i = 4,96 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

Průměrná hodnota za oba dva dny:  $Q_i = 4,29 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

Vzhledem k naměřeným hodnotám lze konstatovat, že se jedná o průměrné hodnoty, kterých lze konvekčními metodami zplyňování biomasy dosáhnout. Běžné hodnoty výhřevnosti syntézního plynu při zplyňování podobné suroviny, jako v tomto případě, se pohybují při laboratorních zkouškách mezi 4 - 6 MJ·m<sup>-3</sup>.

## 6.5 Porovnání syntézních plynů

Při výrobě syntézního plynu z dřevní biomasy se při dodržení stejných podmínek zplyňování a vlhkosti paliva výhřevnost zásadně nemění, bez ohledu na to, jestli bylo použito měkkého nebo tvrdého dřeva. Při využití tuhého alternativního paliva dochází ke zvýšení obsahu hořlavých složek v palivu CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> (obrázek 20) a výhřevnost prudce stoupá.



Obr. 20 Složení syntézního plynu v závislosti na druhu paliva

Z hodnot uvedených v obrázku 20 vychází:

**Měkké dřevo**  $Q_i = 4,82 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

**Tvrdé dřevo**  $Q_i = 4,88 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

**TAP**  $Q_i = 9,72 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

## 6.6 Měření složení emisí a teploty spalin

K měření a vyhodnocení složení plynu bylo použito analyzátoru spalin Testo 350 (obr. 21). Byly provedeny dvě měření v proudu spalin s kontinuálním záznamem. Na odběrném místě se pomocí zavedené sondy prováděl záznam v intervalu 2 s. Naměřené hodnoty se zobrazovaly přímo na displeji analyzátoru a následně se vyhodnocovaly v připojeném počítači. Maximální a průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14.





Obr. 21. Použití analyzátorů

Tabulka 14. Maximální a průměrné hodnoty složení spalin

Složka	T <sub>spalin</sub> (°C)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (ppm)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)
<b>Maximální hodnota první den</b>	577,90	15,33	919,00	11,63	573,70	573,00	3,10	5,00
<b>Maximální hodnota druhý den</b>	537,10	19,78	1087,00	10,51	253,60	251,00	15,60	3,00
<b>Průměrná hodnota za oba dva dny</b>	539,64	2,37	890,58	10,49	363,24	360,52	2,45	1,82

Jednotlivé naměřené hodnoty složek spalin jsou v odpovídajícím poměru vzhledem k běžně měřeným hodnotám. Koncentrace kyslíku ve spalinách odpovídá kvalitnímu spalovacímu procesu. Vyšší koncentrace součtu NO<sub>x</sub> lze přisoudit použitému způsobu zplyňování.

## 6.7 Měření koncentrace prachu a fyzikálních vlastností spalin

Množství prachových částic se stanovovalo pomocí selektivní filtrační metody. Za dobu měření se na filtr zachytilo množství prachových částic odpovídající **0,0304 g·m<sup>-3</sup>**.

Naměřené hodnoty objemového průtoku, tlaku spalin a rychlosti proudění jsou uvedeny v tabulce 15. Počítá se s hustotou plynu  $1,00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a průměrem potrubí 250 mm.

Tabulka 15. Fyzikální vlastnosti spalin

	$\Delta p \text{ (Pa)}$	Rychlost ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Obj. průtok ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
<b>Stěna A</b>	14,00	5,29	0,26
<b>Střed</b>	12,00	4,90	0,24
<b>Stěna B</b>	13,00	5,10	0,25
<b>Průměr</b>	<b>13,00</b>	<b>5,10</b>	<b>0,25</b>
<b>Stěna A</b>	13,00	5,10	0,25
<b>Střed</b>	10,00	4,47	0,22
<b>Stěna B</b>	13,00	5,10	0,25
<b>Průměr</b>	<b>12,00</b>	<b>4,89</b>	<b>0,24</b>

## 6.8 Ekonomika zplyňovacích zařízení

Při stanovení finančních nákladů na realizaci zplyňovací elektrárny, mezi které se musí počítat stavební úpravy i náklady na nákup a montáž samotného strojního zařízení, je velmi důležité, aby je investor stanovil dříve, než se rozhodne zařízení pořídit. Pro zjištění těchto nákladů je zapotřebí pro každý konkrétní případ provést finanční studii, kterou musí vypracovat kompetentní organizace. Dané studie jsou finančně nákladné, a proto je nutné, aby měl investor předem indicie, které mu umožní odhadnout přibližnou výši potřebných investic.

Při počátečním odhadu investic je potřeba zjistit, z jakých zařízení se bude zplyňovací elektrárna skládat. Výše investic na zařízení pro získávání syntézního plynu pouze na vytápění a využívající infrastruktury stávajícího závodu, může být v porovnání s komplexním zařízením s kogenerační jednotkou i více než o polovinu levnější.

Nejefektivnější je ze syntézního plynu získávat elektrickou a zároveň i tepelnou energii pomocí kogenerační jednotky. Cena vyrobené energie je ovlivněna mnoha faktory, které se mohou případ od případu lišit. Mezi nejzásadnější faktory patří:

- cena suroviny (paliva) – využití odpadu z vlastní výroby, nákup paliva, odběr nepoužitelného odpadu,
- využití tepla – využití uvnitř závodu např. k sušení paliva, prodej mimo závod, maření ve vzduchových chladičích,
- počet zaměstnanců,
- způsob financování – dotace, úvěr, bezúročná půjčka, volné prostředky.

Tyto faktory lze mezi sebou různě kombinovat a mohou vznikat dvě krajní situace:

**Dobrá** – palivo tvoří odpad z vlastní výroby, který už nemá další využití, teplo se prodává za komerční cenu a investice je hrazena z dotačních fondů.

**Špatná** – palivo je potřeba nakupovat, teplo se maří a celá investice je hrazena úvěrem.

## 6.9 Shrnutí

Zplyňovací zařízení v Mokrancích je technologie, dovezena z Indie společně s dalším příslušenstvím za pořizovací cenu 600 000 euro v té době, s předpokládanou návratností 3 roky. Bylo předpokládáno, že zakoupený generátor je konstruován na zplyňování slámy, které je v dané lokalitě dostatek. Při prvních provozních zkouškách zplyňovacího generátoru docházelo k problémům v podobě klenbování paliva. Z důvodu nízké sypné hmotnosti slámy (podle sypné hmotnosti dřevní štěpky) dopravník nestačil dávkovat palivo a generátor nedokázal vyrábět potřebné množství syntézního plynu pro kogenerační jednotky. Jak již bylo řečeno, že žádný generátor není určen pro jakýkoli typ paliva, tak i toto zařízení určené k zplyňování dřevní štěpky není schopné efektivně využívat slámu pro získávání plynu.

První projekt počítal s tím, že získané teplo se bude využívat pouze na sušení paliva z biomasy. K novým inovacím se navrhuje teplo využívat kromě sušení paliva i k sušení dřevních pilin určených na výrobu pelet. Další inovací se kterou se počítá je využívání tuhého alternativního paliva. Palivo TAP by se mělo míchat s dřevní štěpkou a následně využívat v generátoru. Výhodou TAP je jeho pořizovací cena, v tomto případě je hrazena pouze doprava. Při použití paliva TAP vzroste také výhřevnost vyrobeného syntézního plynu, z tohoto důvodu je potřeba přenastavit kogenerační jednotku, aby mohla optimálně fungovat. Je těžké předpovědět, jaký bude mít palivo TAP vliv na zplyňovací zařízení s kogenerační jednotkou v dlouhodobějším časovém horizontu. Proto se navrhuje za palivo využívat dřevní štěpku s přídavkem tuhého alternativního paliva.

## 7 ZÁVĚR

Práce se zabývá problematikou zplyňování biomasy pro výrobu syntézního plynu, který se následně využívá v kogenerační jednotce pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie.

První část je napsána ve formě rešerše, ve které je vysvětleno, co je to biomasa, dále její složení, vlastnosti a potřebná úprava biomasy před použitím v generátoru. Následuje popis historických milníků a současnost zplyňování. Poté je vysvětlen princip zplyňování, a to ukázkou jednotlivých typů zplyňovacích generátorů a popisem samotného vyrobeného syntézního plynu, jeho složením, obsaženými nečistotami a způsoby odstraňování nečistot z plynu. Dále jsou uvedeny možnosti následného energetického využití syntézního plynu v plynovém hořáku, spalovacím motoru, spalovací turbíně a v palivovém článku. Další kapitola vysvětluje princip výroby elektrické a tepelné energie pomocí kogenerační jednotky ze syntézního plynu. Druhá část práce se zabývá konkrétním zplyňovacím zařízením s kogenerační jednotkou nacházející se na Slovensku v Mokrancích. Zde jsou popsány technické parametry tohoto zařízení, předpokládané hodnoty od výrobce a skutečné naměřené hodnoty složení vyrobeného syntézního plynu a spalin. Následně jsou také uvedena ekonomická hlediska na realizaci zplyňovacího zařízení.

Většina zplyňovacích zařízení, které využívají biomasy jako palivo s následným použitím syntézního plynu v kogenerační jednotce, nejsou ve stálém dlouhodobějším provozu. Tyto prodlevy jsou způsobeny nespolehlivostí zařízení v provozu, které neodpovídá údajům poskytovaných výrobcem. Proto je potřeba častých oprav a odstavení celého zařízení. Náhradní díly obvykle nebývají v sériové výrobě, a proto se musí nechávat vyrábět na zakázku, což dále prodlužuje dobu zařízení odstaveného mimo provoz. Tyto neplánované opravy zvyšují náklady a dobu návratnosti investic a mohou provozovatele přinutit až ke zrušení provozu zařízení z důvodu prodělečného provozu.

Pro zplyňování je nejlepší využít odpadní biomasu, a to hlavně ve formě dřeva, které se obvykle v dřevozpracujícím průmyslu nijak nevyužívá a je určeno k pouhému spalování anebo ke kompostování. Zplyňování by mohlo v budoucnu také částečně vyřešit problematiku nakládání s nejrůznějšími druhy odpadů. Perspektivním palivem pro zplyňování je například tuhé alternativní palivo (TAP). Zplyňování tohoto paliva (se zápornou cenou) by umožnilo efektivní energetické využití odpadu, který už není možno dále recyklovat. V dnešní době je v České republice nejrozšířenější způsob skládkování komunálního odpadu. V budoucnu by bylo ideální tento odpad využívat na výrobu energie a možná také pomocí zplyňování, ale v tomto ohledu je ještě potřeba mnoha výzkumů, zejména v čištění vyrobeného syntézního plynu, kde množství a druh znečišťujících látek ovlivňuje využití plynu a vyřešení problému nehomogenity komunálního odpadu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARTÁK, Martin. aj. *Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách*. Praha: GAS s.r.o., 2001. ISBN 80-86176-82-7
- [2] LISÝ, Martin. *Čištění energoplynu z biomasy v katalytickém vysokoteplotním filtru*. Brno, 2009. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství energetický ústav
- [3] ŠEJVL, Radovan. *Materiálově-energetické využití biomasy a odpadů pyrolýzou a zplyňováním*, [CD-ROM], Sborník semináře, Energis24, Brno, 21. 4. 2015. [cit. 7. 2. 2018]. Dostupné z: <www.energis24.cz>.
- [4] CHŁOND, Rafał Adam. *Zvyšování výhřevnosti a kvality plynu ze zplyňování biomasy*. Ostrava, 2012. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [5] SLADKÝ, Václav. *Výroba syntézního plynu z pevné biomasy*, [online]. 2010, [cit. 20. 2. 2018]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <www.biom.cz>
- [6] OCHODEK, Tadeáš, KOLONIČNÝ, Jan a JANÁSEK, Pavel. *Potenciál biomasy, druhy, balance a vlastnosti paliv z biomasy*, [online]. Metodická příručka ke studiu, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum. [cit. 23. 1. 2018]. Dostupné z: <www.biomasa-info.cz>.
- [7] KNOEF, H.A.M. *Handbook Biomass Gasification*, Biomas Technology Group, Colosseum 11, Enschede, Nederland, 2012, [cit. 25. 3. 2018]. <www.btgworld.com>.
- [8] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta: peleta mýtů zbavena*. Krnov: LING Vydavatelství s.r.o., 2011. ISBN 978-80-904914-0-3.
- [9] SKOBLJA, Sergej. *Úprava složení plynu ze zplyňování biomasy*. Praha, 2004. Disertační práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta technologie ochrany prostředí.
- [10] NAJSER, Jan. *Zplyňování dřeva pro kogeneraci*. Ostrava, 2008. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Výzkumné energetické centrum.
- [11] ŠULC, Jindřich a kol. *Zplyňování biomasy s kogenerací*, [online]. 2011, [cit. 12. 4. 2018]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <www.biom.cz>.
- [12] MGR INŠ. CHŁOND, Rafał Adam. *Zvyšování výhřevnosti a kvality plynu ze zplyňování biomasy*. Ostrava, 2012. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [13] KLASS, Donald L. *Biomass for renewable energy fuels and chemicals*. USA: Academic Press, 1998. ISBN 0-12-410950-0.
- [14] LACROSSE, L. *Contribution à l'étude du comportement des combustibles lignocellulosiques en gazogène à lit fixe et à tirage inverse*. Gembloux, 1990. Thèse de doctorat. Faculté des sciences agronomiques.
- [15] POHOŘELÝ, Michael a kol. *Zplyňování biomasy*. Chemické listy 106 (4), 2012, ISSN 1213-7103-1803-2309.
- [16] STEVENS, Don J. *Hot Gas Conditionig: Recent Progress With Larger-Scale Biomass Gasification Systems: update and summary of recent progress*. Colorado, 2001. Report. National Renewable Energy Laboratory.

- [17] BASU, Prabir. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Burlington: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-12-374988-8.
- [18] SUTHERLAND, Ken. *Filters and Filtration Handbook*. Burlington: Elsevier Ltd, 2008. 5. ISBN 978-1-8561-7464-0.
- [19] KLUS, Lukáš. *Zplyňování biomasy pro kogeneraci tepla a elektřiny*. Ostrava, 2015. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta FMFI.
- [20] ART KERAMIKA. *Souboj technologií a souboj materiálů kontra válečná pec*, [online]. 2016. [cit. 19. 3. 2018] Dostupné z: <[www.artkeramika.cz](http://www.artkeramika.cz)>.
- [21] TEDOM a.s. [online]. [cit. 19. 3. 2018] Dostupné z: <[www.tedom.com](http://www.tedom.com)>.
- [22] PRICE, Stuart, *Jaguar s plynovou turbínou*. [online]. 2015, [cit. 19. 3. 2015]. Dostupné z: <[www.jenpromuze.cz](http://www.jenpromuze.cz)>.
- [23] REDAKCE PROELEKTROTECHNIKY, *Palivové články*, [online]. 2013, [19. 3. 2018]. Dostupné z: <[www.proelektrotechniky.cz](http://www.proelektrotechniky.cz)>.
- [24] BIOPROFIT, *Anaerobní technologie*, [online]. 2007, [19. 3. 2018]. Dostupné z: <[www.bioplyn.cz](http://www.bioplyn.cz)>.
- [25] RÉDR, Miroslav. *Tepelné hospodářství hutí I*. Ostrava, 1980. Skripta. Vysoká škola báňská v Ostravě, Hutnická fakulta.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1. Závislost výhřevnosti dřeva na jeho vlhkosti
2. Schématické znázornění zplyňovacího procesu
3. Schéma protiproudého reaktoru
4. Schéma souproudého reaktoru
5. Schéma reaktoru s křížovým tokem
6. Schéma reaktoru se stacionární fluidní vrstvou
7. Schéma reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou
8. Použití plynového hořáku při výpalu keramiky
9. Spalovací motor značky Tedom určený do kogenerační jednotky
10. Plynová turbína
11. Palivový článek využit na pohon autobusu
12. Schéma kogenerace
13. Zařízení fléry při spalování syntézního plynu
14. Řízení pomocí počítačového software
15. Dřevní štěpka
16. Ukázka tuhého alternativního paliva
17. Odběr plynu
18. Trendy měřených veličin plynu z prvního dne
19. Trendy měřených veličin plynu z druhého dne
20. Složení syntézního plynu v závislosti na druhu paliva
21. Použití analyzátorů

## SEZNAM TABULEK

1. Složení rostlinné biomasy
2. Úprava biomasy na palivo pro zplyňování
3. Vlastnosti paliva z biomasy
4. Granulometrie biomasy
5. Obsah prchavé hořlaviny v biomase
6. Obsah popelovin vztažený na bezvodý stav
7. Hlavní zlomy ve zplyňování v datech
8. Složení syntézního plynu při použití vzduchu jako zplyňovacího média
9. Přehled chemických reakcí uvnitř reaktoru
10. Parametry syntézního plynu
11. Parametry kogenerační jednotky Schmitt Enertec FMB-318-HSMK
12. Emise spalin naměřené Národní energetickou společností, a. s. + emisní limity
13. Průměrné a maximální složení syntézního plynu
14. Maximální a průměrné hodnoty složení spalin
15. Fyzikální vlastnosti spalin



## SEZNAM VZORCŮ

1. Dokonalé spalování
2. Nedokonalé spalování
3. Boudouardova reakce
4. Heterogenní reakce vodního plynu
5. Heterogenní vznik metanu
6. Homogenní reakce vodního plynu
7. Homogenní vznik metanu
8. Homogenní vznik metanu
9. Částečná oxidace pevného uhlíku
10. Úplná oxidace pevného uhlíku
11. Oxidace CO
12. Oxidace H<sub>2</sub>
13. Oxidace CH<sub>4</sub>
14. Hlavní exotermní zplyňovací reakce
15. Hlavní endotermní zplyňovací reakce
16. Výhřevnost plyných paliv

## **SEZNAM PŘÍLOH**

1. Technologické schéma celého zařízení
2. Schéma technologie zplyňování
3. Schéma strojovny KGJ